
Programme de recherche et d'adaptation technologiques
sur le traitement des fumiers

Rapport final

Installation et essais à la ferme d'un système de
séparation solide-liquide du lisier de porcs
complémenté par la stabilisation et
l'entreposage de la fraction solide

Projet CORPAQ # 703015



INSTITUT DE RECHERCHE
ET DE DÉVELOPPEMENT EN
AGROENVIRONNEMENT

Projet IRDA #140127

Daniel Yves Martin, ing. M. Sc., responsable scientifique
François Léveillé, attaché de recherche
Christine Landry, agr. M.Sc
Rémi Carrier, attaché de recherche

Déposé le 15 mai 2006
Révisé le 3 octobre 2006

Liste des chercheurs et des partenaires

Autres personnes impliquées		Nom de l'organisme
Signature		
Nom imprimé	Marc Laverdière, agr. Ph.D. Dir. scientifique	IRDA
Signature		
Nom imprimé	Adrien N'Dayegamiye, agr. Ph.D.	IRDA
Signature		
Nom imprimé	Caroline Côté, agr. Ph.D.	IRDA
Signature		
Nom imprimé	Roch Joncas, ing. M.Sc.	IRDA
Signature		
Nom imprimé	Fernand Pagé, géologue, Ph.D.	IRDA
Signature		
Nom imprimé	Jean Vigneux, agr. M.Sc.	GSI environnement
Signature		
Nom imprimé	Claude Miville, agr, M.Sc.	FPPQ
Signature		
Nom imprimé	Benoit Legault, secrétaire	FPCCQ
Signature		
Nom imprimé	Pierre Laplante, directeur	Équipements Laplante et Levesque (distributeur Asserva)

Évaluation des performances d'un séparateur décanteur-centrifuge pour du lisier de porcs et valorisation de la fraction solide

**Daniel Yves Martin¹, François Léveillé¹, Rémi Carrier¹, Christine Landry¹,
Adrien N'Dayegamiye¹, Roch Joncas¹, Caroline Côté¹, Fernand Pagé¹**
Durée : Octobre 2003 à mai 2006

Faits saillants

Les résultats obtenus indiquent que le séparateur décanteur-centrifuge évalué (Asserva-300) peut être ajusté aux particularités des lisiers issus de régimes alimentaires à base de moulée produite à la ferme ou cubée et ce, pour tous les types d'élevages porcins. Selon les conditions, le séparateur évalué peut traiter entre de 1,2 et 2,5 m³/heure de lisier brut. Les performances du séparateur décanteur-centrifuge sont étroitement liées au contenu en matière sèche du lisier brut à traiter. Avec du lisier dont la siccité est supérieure à 3 % pour le porc à l'engraissement et à 2% pour le porc à la maternité, on note une efficacité de séparation du phosphore avoisinant les 70%. Sous ces teneurs en matière sèche, les performances de l'appareil décroissent rapidement. La capacité de traitement du séparateur, en termes du nombre de porcs-emplacements traités, croît également avec l'augmentation de la siccité du lisier. Cette relation entre les performances du séparateur et cette caractéristique du lisier met en lumière l'importance d'une gestion optimisée de l'eau dans le bâtiment d'élevage.

Les résultats obtenus démontrent également que l'on peut conditionner et entreposer à la ferme la fraction solide produite par le séparateur de manière à obtenir un matériel concentré en éléments fertilisants, assaini et nettement réduit en odeurs offensantes. Après 90 jours d'observation, les résultats obtenus avec le meilleur traitement indiquent une réduction de la teneur en eau, en carbone, en azote total, en coliformes fécaux et en odeurs respectivement de 75, 35, 19, 51 et 88%. Assainie et dépourvu d'une odeur intense, son spectre d'application comme amendement et engrais organique s'en trouve élargi. La séparation du lisier avec un séparateur décanteur-centrifuge suivie par le conditionnement et l'entreposage de la fraction solide à la ferme, peut permettre à une entreprise porcine faisant face à un surplus de lisier de diminuer ses coûts de gestion des engrais de ferme en optimisant l'usage des terres situées à proximité de la ferme. Elle permet également de réduire les frais d'achats d'engrais minéraux en maximisant l'usage de l'azote disponible dans la fraction liquide, ce qui n'était plus possible avec le lisier brut en vertu de la nouvelle réglementation environnementale.

Objectif et méthodologie

L'objectif du projet était d'évaluer les performances d'un séparateur décanteur-centrifuge pour séparer du lisier de porcs en une fraction solide et liquide et à caractériser ces nouveaux sous-produits. Une approche par bilan de masse a permis d'évaluer les efficacités de séparation des principaux éléments physico-chimiques. Le séparateur a été installé sur une unité mobile permettant de le tester sur différentes fermes d'élevages porcins. Au total, quatre fermes ont été visitées permettant d'observer le comportement de l'équipement avec du lisier de porcs à l'engraissement et à la maternité. Le conditionnement et l'entreposage de la fraction solide ont été réalisés suite à la séparation d'un lisier de porcs à l'engraissement. Des

cellules de confinement de 2,6 m³ ont permis de conditionner et d'entreposer la fraction solide. Pour chaque traitement effectué, la période de conditionnement s'est déroulée sur 10 jours, alors que la période d'observation pour l'entreposage a été de 80 jours. Un suivi des paramètres physico-chimiques et microbiologiques ainsi que des odeurs a été effectué.

Résultats significatifs pour l'industrie

Le projet a permis de préciser et de modéliser le comportement du séparateur. Il est maintenant possible d'estimer mathématiquement les principales composantes physico-chimiques des fractions solide et liquide en connaissant uniquement certaines caractéristiques du lisier de départ. Le projet a apporté une meilleure compréhension sur les moyens à déployer sur la ferme afin d'obtenir une fraction solide concentrée, assainie et moins odorante.

À la lumière des résultats obtenus, il peut être rentable pour un producteur de porcs en situation de surplus d'envisager l'emploi du séparateur. Parmi les avantages économiques, on note la réduction significative des surfaces d'épandages, des frais de disposition des rejets de ferme ainsi que l'utilisation de l'azote contenu dans la fraction liquide.

Applications possibles pour l'industrie

Afin de déterminer l'applicabilité du séparateur chez une entreprise, un outil de simulation a été préparé à l'intention des conseillers. À partir des caractéristiques de départ du lisier brut, cet outil d'aide à la décision jette les bases théoriques pour le dimensionnement des équipements entourant le procédé et pour l'évaluation des coûts de disposition des différentes fractions.

Des recommandations ont également été élaborées afin de fournir des pistes de solution quant au conditionnement et à l'entreposage de la fraction solide générée par le séparateur dans le but d'obtenir un produit possédant des caractéristiques intéressantes pour sa reprise.

Point de contact pour information

Daniel Yves Martin, ing. M.Sc. : daniel-y.martin@irda.qc.ca (418.644.6842)

François Léveillé, attaché de recherche : francois.leveillee@irda.qc.ca (418.644.6812)

Remerciements aux partenaires financiers

Les auteurs tiennent à remercier les organismes suivants pour leur support technique et financier sans qui, un tel projet n'aurait pu être réalisé.

-
- | | |
|--|--|
| • Le MAPAQ par l'entremise de son programme de recherche et d'adaptation technologiques pour le traitement des fumiers | • Développement économique Canada |
| • La Fédération des producteurs de porcs du Québec | • La Fédération des producteurs de cultures commerciales du Québec |
| • Les équipements Laplante et Lévesque Inc. (distributeur Asserva) | • FERTIOR |
| • AGEO | • GSI Environnement Inc. |
| • COGENOR | • Les entreprises d'élevages porcins visitées |
-

Activités de diffusion et de transfert

Activité	Localisation	Date	Nb. de participants
Congrès du porc 2004	Saint-Hyacinthe	Avril 2004	100
Annonce des montants octroyés dans le Cadre stratégique agricole par les ministres fédéral et provincial de l'agriculture	Saint-Hugues	Mai 2004	80
Portes ouvertes IRDA	Deschambault	Septembre 2004	100
Démonstration des essais de rodage	Saint-Lambert de Lauzon	Décembre 2004	30
Congrès Expo-porc 1 ^{er} prix, exposant de l'année	Saint-Hyacinthe	Avril 2005	100
Journée de démonstration	Saint-Lambert de Lauzon	Juin 2006	50
Article dans La Terre de chez-nous	--	Juin 2005	--
Essais et journée de démonstration	Saint-Rock de l'Achigan	Août 2005	60
Essais et journée de démonstration	Saint-Liboire	Octobre 2005	60
Essais et journée de démonstration	Saint-Narcisse	Octobre 2005	40
Salon des technologies de traitement	Scott	Novembre 2005	320
Article dans Le bulletin des agriculteurs (vol.88, #12)	--	Décembre 2005	--
Congrès du porc 2006	Saint-Hyacinthe	Avril 2006	100

Note : Les documents préparés pour ces activités sont présentés dans un document annexé à ce rapport

Activités de transfert scientifique

Activité	Localisation	Date	Nb. de participants
Rencontre technologique du CQVB : Le traitement des lisiers : des solutions sources de valeur	Bécancour	Mai 2006	À venir
Article dans la revue Agrosol	---	À venir	--

Note : Les activités de transfert scientifique découlant du rapport final déposé au CORPAQ, seront réalisées après le dépôt de ce dernier.

Table des matières

<i>Équipe de réalisation</i>	17
<i>Équipe de rédaction</i>	17
<i>Remerciements</i>	17
1 <i>Résumé du projet</i>	19
2 <i>Première partie : Évaluation du séparateur décanteur-centrifuge</i>	21
2.1 Description du procédé	21
2.2 Principe de fonctionnement du décanteur-centrifuge.....	21
2.3 Paramètres d'ajustement du séparateur décanteur-centrifuge	22
3 <i>Matériel et méthodes : séparateur décanteur-centrifuge</i>	24
3.1 Aménagement de l'unité mobile de centrifugation	24
3.2 Choix des sites et déroulement des essais	25
4 <i>Déroulement des essais sur le séparateur décanteur-centrifuge</i>	25
4.1 Procédure d'échantillonnage pour estimer le bilan massique.....	25
4.2 Analyses physico-chimiques et microbiologiques en laboratoire.....	27
4.3 Méthodes d'évaluation terrain	27
4.4 Mesure de la consommation d'énergie	28
4.5 Courbe granulométrique des particules de solide	28
5 <i>Présentation des résultats d'essais avec le séparateur décanteur-centrifuge</i>	29
5.1 Débit de lisier traité et siccité des produits	29
5.2 Résultats d'analyse et efficacité d'extraction du séparateur	29
5.2.1 Lisier de porcs à l'engraissement	30
5.2.2 Lisier issu d'une maternité avec moulée préparée à la ferme	32
5.2.3 Courbe granulométrique des particules de matières solides	33
5.3 Performance des méthodes terrains employées lors des évaluations de la <i>matière sèche et du phosphore</i>	35
5.4 Discussion sur les résultats d'efficacité d'extraction.....	36
5.4.1 Extraction du phosphore.....	36
5.4.2 Extraction de la matière sèche.....	37
5.4.3 Extraction de l'azote.....	38
5.4.4 Extraction du potassium	40
5.4.5 Impact de l'ajustement de l'anneau liquide sur l'efficacité d'extraction du phosphore et de la matière sèche ainsi que sur la siccité de la fraction solide	40
6 <i>Élaboration du modèle prévisionnel</i>	42

6.1	Débit de lisier traité : impact de la siccité du lisier brut sur le débit maximal de fonctionnement	42
6.2	Débit de fraction liquide rejetée.....	43
6.3	Impact de la siccité du lisier brut sur la siccité de la fraction liquide rejetée... 44	44
6.4	Siccité de la fraction solide	44
6.5	Masse volumique des fractions brut, liquide et solide	45
6.6	Évaluation de la capacité de traitement maximal du séparateur décanteur-centrifuge (nombre de porcs-emplacements traités)	45
6.7	Efficacité d'extraction des principaux éléments.....	47
6.7.1	Concentration d'azote total retrouvée dans la fraction liquide.....	47
6.7.2	Concentration en phosphore total retrouvée dans la fraction liquide.....	47
6.7.3	Concentration en potassium total retrouvée dans la fraction liquide	48
6.7.4	Utilisation du modèle prévisionnel.....	48
6.8	Potentiel de valorisation de la fraction liquide	49
7	<i>Conclusion sur les résultats de l'évaluation du séparateur décanteur-centrifuge</i>	51
8	<i>Deuxième partie : Conditionnement et entreposage de la fraction solide.....</i>	52
9	<i>Matériel et méthodes des essais de conditionnement de la fraction solide.....</i>	53
9.1	Cellules de conditionnement.....	53
9.2	Cellules de maturation	55
9.3	Prise d'échantillons	55
9.4	Analyses physico-chimiques et microbiologiques.....	56
9.5	Mesure d'odeur.....	56
9.6	Description des traitements	57
10	<i>Résultats des essais sur la fraction solide</i>	58
10.1	Caractérisation de la fraction solide issue du séparateur.....	58
10.2	Conditionnement	58
10.3	Maturation	63
10.4	Évolution des odeurs	68
10.5	Évolution des agents pathogènes.....	70
11	<i>Analyse et discussion des essais de conditionnement de la fraction solide.....</i>	71
11.1	Comparaison des traitements.....	71
11.2	Impact du traitement sur la valeur économique de la fraction solide.....	73
11.3	Intérêt agronomique de la fraction solide traitée	74
11.4	Recommandations générales pour le conditionnement de la fraction solide	75

12	<i>Conclusion des essais sur le conditionnement de la fraction solide</i>	76
13	<i>Troisième partie : Simulation technico-économique</i>	78
13.1	<i>Description de la ferme et données de départ</i>	78
13.2	<i>Situation avant implantation d'un décanteur-centrifuge</i>	79
13.3	<i>Situation après implantation d'un décanteur-centrifuge</i>	80
13.4	<i>Conclusion de l'analyse économique</i>	82
14	<i>Conclusion du projet</i>	83

Liste des tableaux

<i>Tableau 1: Sites d'essais et de démonstration du décanteur-centrifuge</i>	25
<i>Tableau 2: Échantillonnage des fractions liquides et solide pour l'établissement du bilan massique</i>	27
<i>Tableau 3: Résultats d'analyses pour les éléments bio-physiques des échantillons de lisier de porcs à l'engraissement nourris avec de la moulée préparée à la ferme</i>	30
<i>Tableau 4: Résultats d'analyses pour les éléments bio-physiques des échantillons de lisier de porcs à l'engraissement nourris avec de la moulée cubée</i>	31
<i>Tableau 5 : Efficacité de séparation des principaux éléments bio-physiques pour le lisier de porcs à l'engraissement nourris avec de la moulée fabriquée à la ferme</i>	31
<i>Tableau 6: Efficacité de séparation des principaux éléments bio-physiques pour le lisier de porcs à l'engraissement nourris avec de la moulée cubée</i>	32
<i>Tableau 7: Résultats d'analyses pour les éléments bio-physiques des échantillons de lisier de porcs à la maternité nourris avec de la moulée fabriquée à la ferme</i>	32
<i>Tableau 8: Efficacité de séparation des principaux éléments bio-physiques pour le lisier de porcs à la maternité nourris avec de la moulée fabriquée à la ferme</i>	32
<i>Tableau 9: Traitements appliqués à la fraction solide</i>	57
<i>Tableau 10: Propriétés physico-chimiques des fractions solides à la sortie du séparateur</i>	60
<i>Tableau 11: Caractéristiques des fractions solides après la période de conditionnement selon les traitements</i>	63
<i>Tableau 12: Caractéristiques des fractions solides à la fin de la période de maturation selon les traitements</i>	65
<i>Tableau 13: Variation de la concentration de Cuivre, Fer et Zinc entre le début et la fin du traitement C9c-M0</i>	66
<i>Tableau 14: Estimation des pertes en éléments volatils à la fin de la période de maturation selon les traitements</i>	66
<i>Tableau 15: Évaluation du seuil de détection d'odeur pour le traitement C10-M0 au jour 0</i>	69
<i>Tableau 16: Sommaire de la variation des indicateurs de performance au cours des traitements</i>	72
<i>Tableau 17: Grille d'évaluation des performances des différents traitements</i>	72
<i>Tableau 18: Valeur commerciale théorique d'une fraction solide fraîche et traitée</i>	73
<i>Tableau 19: Sommaire des résultats de la simulation économique</i>	81

Liste des figures

Figure 1: Description du procédé de centrifugation adapté aux opérations de la ferme.....	21
Figure 2: Fonctionnement du séparateur décanteur-centrifuge.....	22
Figure 3: Pastille d'ajustement.....	23
Figure 4: Ajustement de l'anneau liquide.....	23
Figure 5: Représentation schématique de l'anneau liquide.....	23
Figure 6: Vue extérieure de l'unité mobile.....	24
Figure 7: Schéma d'aménagement de l'unité mobile.....	24
Figure 8: Vue extérieure de l'unité mobile.....	24
Figure 9: Vue intérieure de l'unité mobile.....	24
Figure 10: Échantillonnage et prise de mesures pour l'établissement d'un bilan massique ...	26
Figure 11: Courbe type représentant la répartition granulométrique d'un lisier brut pour le porc à l'engraissement.....	33
Figure 12: Courbe type représentant la répartition granulométrique d'une fraction liquide pour le porc à l'engraissement.....	34
Figure 13: Courbe type représentant la répartition granulométrique d'une fraction solide reconstituée de porc à l'engraissement.....	34
Figure 14: Corrélation des résultats entre les valeurs terrains et les analyses du laboratoire pour la matière sèche du lisier brut et de la fraction liquide.....	35
Figure 15: Corrélation des résultats entre les valeurs terrains et les analyses du laboratoire pour la siccité de la matière sèche de la fraction solide.....	35
Figure 16: Corrélation des résultats entre les valeurs terrains et les analyses du laboratoire pour la concentration de P_{total} pour le lisier brut et pour la fraction liquide.....	36
Figure 17: Efficacités d'extraction du phosphore obtenues lors des essais de séparation pour le lisier de porcs à l'engraissement et de maternité en fonction du taux de matières sèches du lisier brut.....	37
Figure 18: Efficacités d'extraction de la matière sèche obtenue lors des essais de séparation pour le lisier de porcs à l'engraissement et à la maternité en fonction des taux de matière sèche du lisier brut.....	38
Figure 19: Concentration en azote organique de la fraction liquide en fonction de la concentration du N organique du lisier brut.....	38
Figure 20: Concentration en azote organique de la fraction liquide en fonction de la concentration du N total du lisier brut.....	38
Figure 21: Concentration de azote total de la fraction liquide en fonction de la concentration en azote total du lisier brut.....	39
Figure 22: Concentration en potassium de la fraction liquide en fonction de la concentration en potassium du lisier brut.....	40
Figure 23: Impact de l'ajustement de l'anneau sur l'efficacité d'extraction du phosphore et de la matière sèche ainsi que sur la siccité de la fraction solide.....	41
Figure 24: Relation entre la siccité du lisier brut et le débit traité.....	42
Figure 25: Débit de fraction liquide rejetée en fonction du débit de lisier brut traité par le séparateur décanteur-centrifuge.....	43
Figure 26: Taux de matières sèches de la fraction liquide en fonction du taux de matières sèches du lisier brut.....	44

<i>Figure 27: Estimation de la production journalière de lisier pour les porcs à l'engraissement en fonction du taux de matières sèches du lisier brut, (Seydoux et al. (2005)).....</i>	<i>45</i>
<i>Figure 28: Capacité maximale de traitement du décanteur-centrifuge (en nb. de porcs-emplacements) en fonction de la matière sèche du lisier brut pour 8 heures de traitement journalier.....</i>	<i>46</i>
<i>Figure 29: Concentration de N_{total} de la fraction liquide en fonction de la concentration en N_{total} du lisier brut.....</i>	<i>47</i>
<i>Figure 30: Concentration en P_{total} de la fraction liquide en fonction de la concentration en P_{total} du lisier brut.....</i>	<i>47</i>
<i>Figure 31: Concentration de K_{total} de la fraction liquide en fonction de la concentration en K_{total} du lisier brut.....</i>	<i>48</i>
<i>Figure 32: Montage des cellules de conditionnement.....</i>	<i>53</i>
<i>Figure 33: Montage du plénum de ventilation.....</i>	<i>54</i>
<i>Figure 34: Essai olfactométrique.....</i>	<i>56</i>
<i>Figure 35: Amas en fin de conditionnement (C9c-M0).....</i>	<i>59</i>
<i>Figure 36: Températures moyennes dans les cellules pour les conditionnements C0-M0 (a), C10-M10 (b) et C10-M80 (c)</i>	<i>61</i>
<i>Figure 37: Températures moyennes dans les cellules pour les conditionnements C8-M0 (a) et C9c-M0 (b)</i>	<i>62</i>
<i>Figure 38: Pertes en masse totale (a), en eau (b) et en matières sèches (c) au cours des traitements</i>	<i>67</i>
<i>Figure 39: Pertes en carbone (a) et en azote total (b) au cours des traitements.....</i>	<i>68</i>
<i>Figure 40: Évolution du niveau d'odeur selon les traitements</i>	<i>69</i>
<i>Figure 41: Population de coliformes fécaux selon les traitements</i>	<i>70</i>
<i>Figure 42: Population de E.coli selon les traitements.....</i>	<i>71</i>

Équipe de réalisation

Responsable scientifique :	Daniel Yves Martin, ing. M.Sc.	IRDA inc.
Collaborateurs:	Francois Léveillé, attaché de recherche	IRDA inc.
	Rémi Carrier, attaché de recherche	IRDA inc.
	Christine Landry, agr. M.Sc.	IRDA inc.
	Adrien N'Dayegamiye, agr. Ph.D.	IRDA inc.
	Roch Joncas, ing., agr. M.Sc	IRDA inc.
	Fernand Pagé, pédologue, Ph.D.	IRDA inc.
	Caroline Côté, agr. Ph.D.	IRDA inc.

Équipe de rédaction

Daniel Yves Martin, ing. M.Sc.	IRDA inc.
Francois Léveillé, attaché de recherche	IRDA inc.
Christine Landry, agr. M.Sc	IRDA inc.
Rémi Carrier, attaché de recherche	IRDA inc.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier les organismes suivant pour leur support technique et financier sans qui, un tel projet n'aurait pu être réalisé :

- Le MAPAQ par l'entremise de son programme de recherche et d'adaptation technologiques pour le traitement des fumiers
- Développement économique Canada
- La Fédération des producteurs de porcs du Québec
- La Fédération des producteurs de cultures commerciales du Québec
- Les équipements Laplante et Lévesque inc.
- Asserva Sa.
- AGEO
- FERTIOR
- COGENOR
- GSI Environnement inc.
- Ainsi que les entreprises d'élevage porcin visitées lors des expérimentations

1 Résumé du projet

Le présent projet avait comme objectifs d'évaluer la performance du séparateur décanteur-centrifuge pour la séparation du lisier de porcs, d'évaluer des pratiques de conditionnement et d'entreposage de la fraction solide à la ferme et de créer une vitrine de transfert technologique. La première partie de cette étude résume les résultats de l'évaluation du séparateur décanteur-centrifuge. En 2004, l'IRDA faisait l'acquisition d'un séparateur décanteur-centrifuge de marque Asserva-300 pour réaliser ces travaux. Cet équipement fut installé dans une unité mobile de manière à rendre flexible son utilisation sur l'ensemble du territoire québécois. Des essais ont été réalisés dans des élevages de porcs à l'engraissement et à la maternité nourris avec de la moulée fabriquée à la ferme ou avec de la moulée cubée. Les impacts suite aux ajustements de la centrifugeuse ont également été évalués.

Les essais ont démontré une grande variabilité dans les résultats d'efficacité de séparation du phosphore allant de 38 à 74% pour toutes les campagnes d'échantillonnages confondues. Cette grande fluctuation est principalement associée à la nature même du lisier à traiter. L'analyse démontre plus spécifiquement l'influence de la siccité du lisier brut sur l'efficacité d'extraction du phosphore. Ainsi, pour du lisier de porcs à l'engraissement, une efficacité d'extraction du phosphore avoisinant 70% peut être obtenue pour un lisier brut ayant une siccité de plus de 3% de matières sèches. Afin d'obtenir une efficacité d'extraction similaire avec du lisier de maternité, la concentration critique en matières sèches avoisine 1,7%.

À la lumière des résultats d'essais, il a été possible d'établir des relations qui permettent de prévoir le comportement du séparateur lorsque l'on connaît certaines caractéristiques d'un lisier brut à traiter. L'intégration de ces relations a conduit à l'élaboration d'un outil d'aide à la décision. En introduisant certains paramètres de départ, notamment les caractéristiques du lisier brut à traiter et le nombre de porcs à l'engraissement, celui-ci produit un bilan de masse complet et estime l'efficacité d'extraction des principaux éléments fertilisants.

La seconde partie du rapport présente les conclusions des essais sur le conditionnement et l'entreposage de la fraction solide générée par la séparation du lisier. Parmi les traitements effectués pour valoriser la fraction solide, celui s'étant avéré le plus prometteur procède au conditionnement du solide en utilisant un faible débit de ventilation continue pendant une période de neuf jours, suivi d'un fort débit de ventilation pendant une journée. À la fin de la période de maturation de 90 jours, les résultats obtenus avec ce traitement indiquent une réduction des teneurs en eau, en carbone, en azote total, en coliformes fécaux et en odeur respectivement de 75, 35, 19, 51 et 88%. Ces résultats démontrent qu'en utilisant la propriété intrinsèque de la fraction solide à chauffer rapidement en présence d'air, on peut évaporer une grande quantité d'eau et ainsi « neutraliser » l'activité microbienne tout en diminuant les pertes en éléments fertilisants. Après environ 30 jours de maturation, une fraction solide ainsi conditionnée a déjà atteint la majorité des propriétés favorisant son exportation.

La simulation économique pour une entreprise en situation de surplus de phosphore regroupant tous les aspects du procédé de séparation du lisier de porcs et de conditionnement de la fraction solide compose la troisième partie de l'étude. Cette simulation a permis d'évaluer à 2,18\$ par porc produit (2,45\$ m⁻³ de lisier brut) l'économie engendrée par l'utilisation de la centrifugeuse combinée au traitement de la fraction solide par rapport à une gestion conventionnelle (épandage du lisier sur des superficies éloignées du site de production).

2 Première partie : Évaluation du séparateur décanteur-centrifuge

2.1 Description du procédé

La séparation par centrifugation du lisier de porc en une partie solide et une partie liquide est un procédé largement utilisé en Europe. Ce procédé s'adapte aux opérations journalières aussi bien pour une grande entreprise porcine que pour une ferme de dimension plus modeste.

Puisque la dégradation des particules pendant l'entreposage du lisier affecte grandement la performance de séparation, l'approche suggère l'utilisation d'un lisier frais récupéré d'une pré-fosse (Figure 1) plutôt que le traitement du lisier entreposé à la fosse. En effet, le contenu en matières sèches du lisier brut décroît avec le temps d'entreposage. Les solides dissous sont transformés en gaz et les plus grosses particules de solide sont transformées en plus petites particules (Moller *et al.*, 2002). Toujours selon Moller *et al.* (2002), le séparateur décanteur-centrifuge permet de séparer des particules supérieures à 25 microns. Ainsi, il est préférable de maintenir la quantité la plus importante possible de grosses particules dans le lisier à traiter.

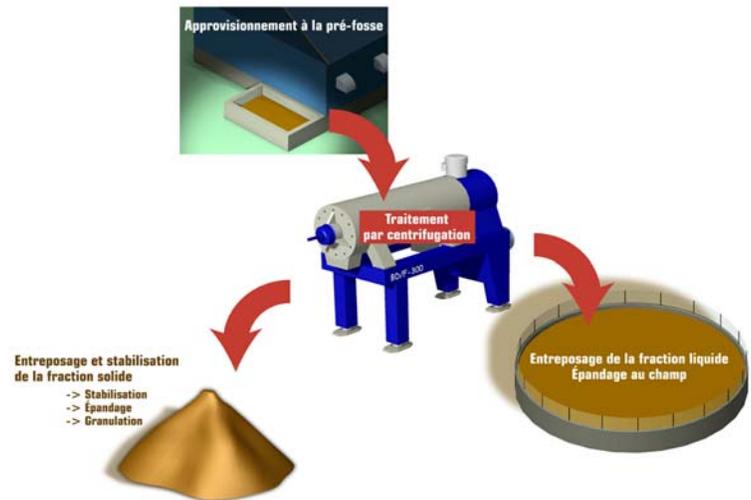


Figure 1: Description du procédé de centrifugation adapté aux opérations de la ferme

Le procédé de séparation prévoit qu'une fois pompé de la pré-fosse, le lisier frais est transféré dans un réservoir d'homogénéisation pour ensuite être acheminé vers la centrifugeuse. Il en résulte une fraction solide riche en phosphore et une fraction liquide contenant une portion importante de l'azote. Cette fraction liquide est entreposée dans la fosse existante.

2.2 Principe de fonctionnement du décanteur-centrifuge

Le séparateur utilise la force centrifuge afin de séparer le solide contenu dans le lisier brut. On utilise souvent le terme « force g » pour décrire la force appliquée sur un corps soumis à une accélération. Dans le cas de la centrifugeuse évaluée, les équations proposées par Records et Sutherland (2001) permettent d'évaluer cette force à près de 3 030 g. Cette force considérable plaque les particules solides sur les parois internes du bol en rotation (Figure 2). Une vis sans fin récupère ce solide et le redirige vers la section conique du bol. C'est dans cette dernière section que le solide est essoré avant son évacuation.

Le séparateur décanteur-centrifuge permet ainsi non seulement la séparation du solide mais également sa déshydratation donnant à ce dernier des caractéristiques intéressantes facilitant sa reprise pour une éventuelle valorisation. Les caractéristiques du séparateur évalué sont décrites à l'annexe I.

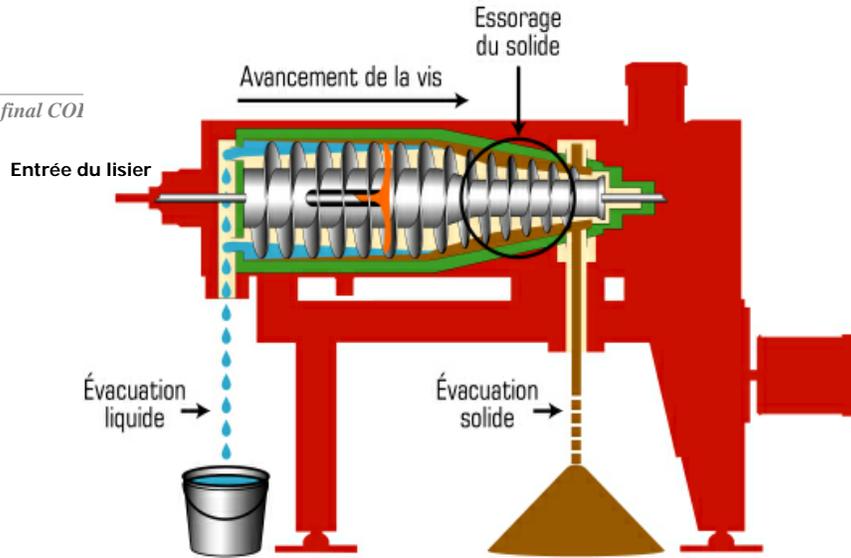


Figure 2: Fonctionnement du séparateur décanteur-centrifuge

2.3 Paramètres d'ajustement du séparateur décanteur-centrifuge

Quatre paramètres d'ajustement sont possibles sur le modèle de séparateur évalué :

- Débit d'alimentation du lisier brut;
- Modification du niveau de liquide dans le bol (anneau liquide);
- Différentiel de la vitesse de rotation entre le bol et la vis;
- Vitesse de rotation du bol.

Il est à noter que les deux premiers paramètres sont facilement modifiables par l'opérateur (producteur agricole) alors que les deux derniers devraient être établis aux cours de la phase d'implantation du séparateur et donc être effectuées par le fournisseur d'équipement.

Le débit de lisier brut traité par le séparateur décanteur-centrifuge testé varie de 1,2 à 2,5 m³ h⁻¹ selon les conditions. Le débit pouvant transiter dans le séparateur est largement gouverné par la teneur en matières sèches recherchée dans la fraction solide. Cet aspect est largement discuté au chapitre 6 sur l'établissement du modèle prévisionnel.

Parmi les ajustements cités, la modification du niveau de liquide dans le bol (anneau liquide) est le paramètre produisant le plus de variations sur les caractéristiques de la fraction solide générée. L'ajustement s'effectue par la rotation d'orifices de contrôle de niveau (au nombre de 4) (Figure 3) localisés au bout de la centrifugeuse, du côté de l'évacuation de la fraction liquide (Figure 2). Cet ajustement assure le maintien du niveau de liquide désiré à l'intérieur du bol en rotation (Figure 5). Plus le niveau de liquide est mince, plus l'effet d'assèchement de la fraction solide sera important. Par contre, un niveau de liquide élevé permet généralement une efficacité d'extraction supérieure des éléments contenus dans l'effluent mais, en contre-partie, produit une fraction solide nettement plus humide. La Figure 4 schématise l'ajustement de l'anneau liquide. Il s'agit d'une opération d'environ 15 minutes qui doit être effectuée au besoin selon les caractéristiques que l'on désire obtenir pour la fraction solide.

Le troisième paramètre d'ajustement est la vitesse différentielle entre le bol et la vis. Plus complexe, cet ajustement s'effectue par le changement d'un jeu de poulies et de courroies de transmission (temps d'ajustement estimé à 1 heure). De manière générale, ce différentiel a été maintenu à 13 tours par minute pour la plupart des essais, tel que recommandé par le fabricant.

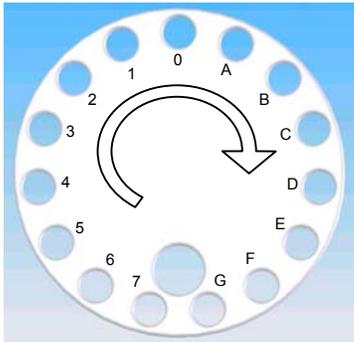


Figure 3: Pastille d'ajustement

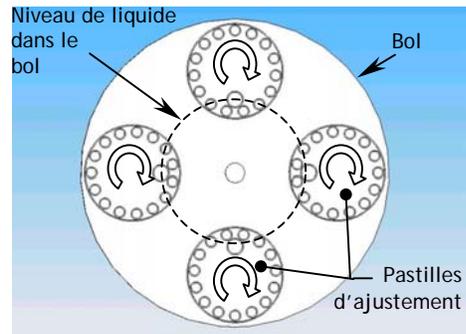


Figure 4: Ajustement de l'anneau liquide

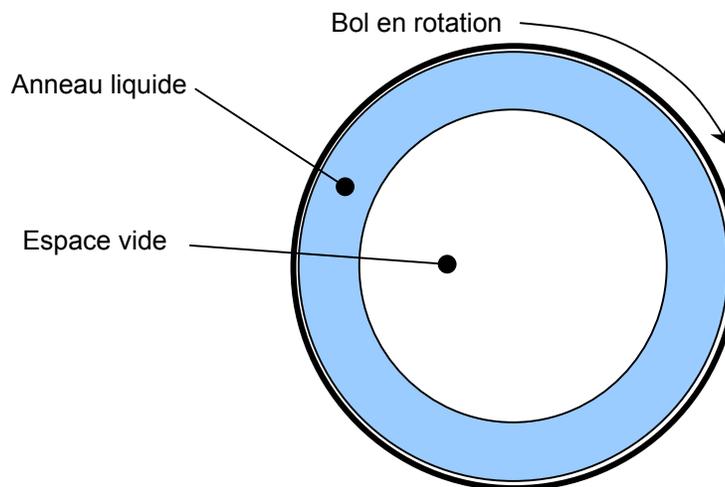


Figure 5: Représentation schématique de l'anneau liquide

Le changement de vitesse de rotation du bol est un quatrième paramètre d'ajustement possible. Néanmoins, de l'avis du fabricant, il y a tout avantage à maximiser l'effet centrifuge du séparateur pour augmenter l'efficacité de l'équipement. Ainsi, ce paramètre a été maintenu aussi élevé que possible et est demeuré constant tout au long des différents essais. La vitesse de rotation du bol a été de 4 400 tours par minute, telle que recommandé par le fabricant.

3 Matériel et méthodes : séparateur décanteur-centrifuge

3.1 Aménagement de l'unité mobile de centrifugation

Le séparateur décanteur-centrifuge ainsi que les équipements connexes ont été installés dans une unité mobile (Figures 6 à 9). Trois sections de travail, telles que décrites à la Figure 7, ont été aménagées dans l'unité mobile de 8 mètres de long. Lors des essais, les besoins énergétiques ont été assurés par une génératrice de 60 kW fournissant une tension de 600 V.

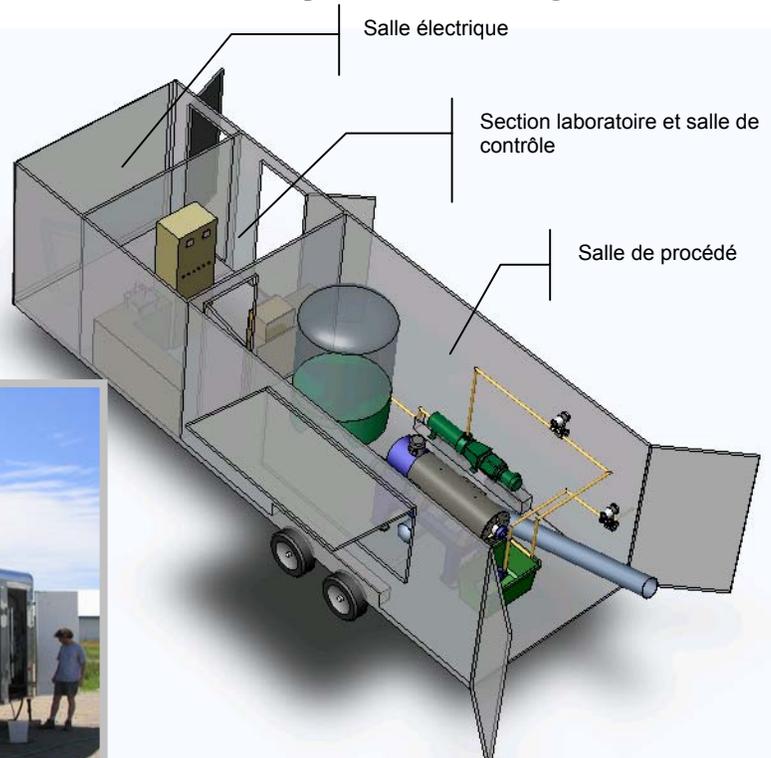


Figure 7: Schéma d'aménagement de l'unité mobile.



Figure 6: Vue extérieure de l'unité mobile.



Figure 9: Vue intérieure de l'unité mobile.



Figure 8: Vue extérieure de l'unité mobile.

3.2 Choix des sites et déroulement des essais

L'hiver 2004-2005 a été consacré au rodage des équipements et à la production de fraction solide pour les besoins du projet. Ainsi, des essais à l'intérieur d'un bâtiment situé à Saint-Lambert de Lauzon ont été réalisés entre décembre 2004 et février 2005. De plus, des essais supplémentaires se sont tenus sur une exploitation de Saint-Lambert de Lauzon au printemps 2005. Ces essais avaient pour but de valider la méthodologie d'évaluation en plus de se familiariser d'avantage avec la technologie.

Au total, cinq sites d'essais et de démonstration ont été sélectionnés. Le tableau suivant dresse la liste des entreprises visitées lors des essais du séparateur décanteur-centrifuge (Tableau 1).

Tableau 1: Sites d'essais et de démonstration du décanteur-centrifuge

Sites	Localisation	Élevage	Alimentation	Activité	# essais
#1	Saint-Lambert de Lauzon	Engraissement, maternité	Moulée à la ferme	Essais	497-560
#2	Saint-Lambert de Lauzon*	Engraissement	Moulée à la ferme	Journée de démonstration	
#3	Saint-Rock de l'Achigan	Engraissement	Moulée commerciale	Essais et journée de démonstration	588
#4	Saint-Liboire	Engraissement	Moulée à la ferme	Essais et journée de démonstration	629-630
#5	Saint-Narcisse	Engraissement	Moulée commerciale	Essais et journée de démonstration	645-649

*Site de la ferme expérimental de l'IRDA pour une journée de démonstration uniquement

4 Déroulement des essais sur le séparateur décanteur-centrifuge

C'est au printemps 2005 que les essais en conditions réelles ainsi que les démonstrations ont débuté. Les opérations suivantes ont été réalisées pour chacun des sites visités.

- Installer et adapter les équipements au site d'essai ;
- Procéder au rodage et à l'ajustement des paramètres de la centrifugeuse ;
- Procéder à l'échantillonnage des phases brut, solide et liquide pour l'établissement du bilan massique ;
- Organiser la journée de démonstration à la ferme ;
- Démanteler les installations et procéder au nettoyage et à l'assainissement des équipements en vue des futurs essais.

4.1 Procédure d'échantillonnage pour estimer le bilan massique

Pour chacun des sites visités, l'équipe de l'IRDA a procédé à des essais de performance. Afin de mesurer l'efficacité de séparation pour chacun des éléments visés, des bilans massiques ont été estimés à partir de données mesurées, complétées par des valeurs calculées lorsqu'il était impossible de les obtenir sur le terrain.

Rappelons que pour estimer le bilan massique il est nécessaire de :

- Estimer les masses transitant dans le système (lisier brut, fraction liquide et fraction solide);
- Échantillonner les trois fractions afin de procéder aux analyses physico-chimiques.

Suite aux essais de rodage, certaines mesures correctives concernant l'échantillonnage et la mesure des masses ont été apportées. Ainsi, le débit volumique du lisier brut entrant dans le système a été mesuré, tel que prévu, avec un débitmètre magnétique (ABB, Copa-XE series 10DX4311, 38 mm, précision $\pm 0,05$ L). Pour sa part, la fraction solide a été pesée à l'aide d'une balance (Ohaus, CQ100L11W, capacité de 100 kg à $\pm 0,01$ kg).

Pour la fraction liquide, l'emploi d'un débitmètre magnétique était à proscrire. La formation très importante de mousse empêchait l'appareil de mesurer adéquatement le débit de liquide circulant dans le tuyau. En conséquence, les valeurs permettant de balancer le bilan massique ont été estimées par la relation suivante :

$$M_{FL} = M_{LB} - M_{FS}$$

Où :

M_{FL} : Masse de la fraction liquide (kg) ;
 M_{LB} : Masse du lisier brut (kg) ;
 M_{FS} : Masse de la fraction solide (kg) .

Et :

$$M_{LB} = V_{LB} \times \rho_{LB}$$

Où :

M_{LB} : Masse du lisier brut (kg) ;
 V_{LB} : Volume du lisier brut (m^3) ;
 ρ_{LB} : Masse volumique du lisier brut ($kg\ m^{-3}$).

La Figure 10 schématise les points d'échantillonnages et de mesures pour l'établissement du bilan massique.

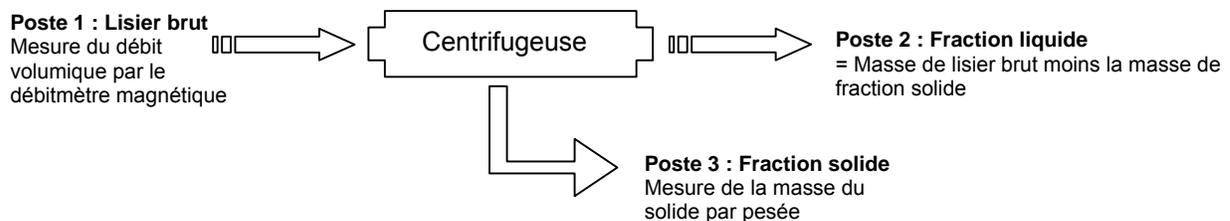


Figure 10: Échantillonnage et prise de mesures pour l'établissement d'un bilan massique

L'opération de mesure et d'échantillonnage s'est déroulée sur un cycle de 30 minutes. Durant cet intervalle, tout le volume de lisier brut a été mesuré. Le solide généré par le séparateur décanteur-centrifuge a été entièrement récupéré pendant la même période de temps avant d'être pesé.

Pour tous les essais, quatre échantillons d'environ 500 ml pour chacun des postes ont été récupérés pour fin d'analyse (12 échantillons au total). L'échantillonnage des fractions liquide et solide a été réparti tel que décrit au Tableau 2 afin de laisser un délai entre le moment d'injection du lisier brut dans le séparateur et la sortie des deux fractions hors de celui-ci. Les échantillons ont été mis au frais jusqu'à leur analyse.

Tableau 2: Échantillonnage des fractions liquides et solide pour l'établissement du bilan massique

Points de mesure	Détails d'échantillonnage	Séquence d'échantillonnage
Poste 1 : Lisier brut	Récolté au débitmètre, puis mélangé avant d'être échantillonné	à 2,10,18 et 26, minutes
Poste 2 : Fraction liquide	Échantillonnée à la sortie de la centrifugeuse (côté liquide)	à 3,11,19 et 27, minutes
Poste 3 : Fraction solide	Échantillonnée à la sortie de la centrifugeuse (côté solide)	à 4,12,20 et 28, minutes

4.2 Analyses physico-chimiques et microbiologiques en laboratoire

Les échantillons du lisier brut, de la fraction liquide et de la fraction solide ont été analysés au laboratoire des sols de l'IRDA du Complexe scientifique. Des analyses sur les éléments suivants ont été réalisées :

- Masse volumique ρ
- Matière organique MO
- Matières sèches MS
- Azote total N_{total}
- Phosphore total P_{total}
- Potassium total K_{total}
- Cuivre total Cu_{total}
- Zinc total Zn_{total}
- Manganèse total Mn_{total}
- Calcium total Ca_{total}
- Magnésium total Mg_{total}
- Demande chimique en O_2 DCO

4.3 Méthodes d'évaluation terrain

Pour obtenir de l'information sur les performances de séparation du décanteur-centrifuge et ainsi arriver rapidement à un ajustement optimal, nous avons utilisé deux méthodes d'analyse *in situ* afin de déterminer le contenu en matières sèches et en phosphore dans le lisier brut, dans la fraction liquide et dans la fraction solide. La validation de ces techniques simples d'évaluation nous a permis d'ajuster et de vérifier les équipements sans avoir à attendre les résultats d'analyses des échantillons expédiés au laboratoire.

4.4 Mesure de la consommation d'énergie

Afin de mesurer avec précision l'énergie utilisée par le procédé nous disposons de trois sources :

- Un wattmètre (CGE, Gentec 28360693, précision +/- 0,5 kWh) installé à l'entrée électrique de l'unité mobile;
- Un multimètre (Sperry, DSA-700, précision lecture du courant +/- 1,5%, précision lecture de la tension +/- 2%) permettant d'évaluer la tension et le courant électrique fournie par la génératrice;
- Un ampèremètre localisé dans l'automate de contrôle de la centrifugeuse .

Les deux premiers appareils mesurent la consommation de tous les équipements électriques de l'unité mobile. Ainsi, le wattmètre nous fournit une mesure directe de la consommation énergétique, tandis que le multimètre mesure le courant demandé par le système.

Pour sa part, l'ampèremètre localisé dans l'automate de contrôle de la centrifugeuse indique la consommation électrique uniquement de cette dernière. Durant les essais, le courant utilisé par le séparateur a varié entre 5 et 9 A selon la charge appliquée. L'intensité du courant est un paramètre fondamental à surveiller lors du fonctionnement de l'appareil.

4.5 Courbe granulométrique des particules de solide

Nous avons procédé à l'analyse granulométrique des particules retrouvées dans le lisier brut et dans les fractions liquide et solide. Cette évaluation a été réalisée à l'aide d'un appareil utilisant une technologie par diffraction au laser (Malvern Instruments Ltd, Mastersizer 2000) et qui établit la distribution des particules (en pourcentage de volume occupé) en fonction de leur dimension et ce, pour des composés liquides. Ainsi, les fractions brut et liquide ont été analysées directement par l'appareil. Pour sa part, la fraction solide fut remise en solution avant d'être analysée par l'appareil.

5 Présentation des résultats d'essais avec le séparateur décanteur-centrifuge

Les tableaux suivants présentent les résultats bruts de tous les essais réalisés au cours du projet. Ces essais, réalisés chez plusieurs entreprises porcines, ont permis d'explorer la performance du séparateur en fonction de divers critères soit :

- Une siccité du lisier brut variant de 1,4 à 13,1%;
- Du lisier brut issu de porcs à l'engraissement et à la maternité;
- Du lisier brut issu de porcs alimentés avec de la moulée produite à la ferme et de la moulée cubée.

Ils ont été réalisés en utilisant une vaste gamme d'ajustements de l'anneau liquide qui devaient conduire à l'obtention d'une fraction solide avoisinant les 30 à 40% de siccité. De plus, tous ces essais ont été accomplis en respectant des courants de fonctionnement adéquats.

5.1 Débit de lisier traité et siccité des produits

Les essais ont été effectués sur une gamme de débits se situant entre 1,2 et 2,5 m³ h⁻¹. L'ajustement permettant un débit de 1,2 m³ h⁻¹ représentait le minimum de la pompe et 2,5 m³ h⁻¹ représentait le débit maximal de lisier pouvant être traité par la centrifugeuse pour un courant de fonctionnement sécuritaire. La teneur en matières sèches a varié de 1,4 à 13,1% pour l'ensemble des lisiers traités.

Avant l'ajustement d'optimisation de la centrifugeuse, la siccité de la fraction solide pouvait varier de 18 à 47%. Une fois ajustée pour les fins de l'expérimentation, celle-ci devait se situer entre 30 et 40% de manière à identifier les ajustements qui fournissent les meilleures conditions pour valoriser la fraction solide.

5.2 Résultats d'analyse et efficacité d'extraction du séparateur

Les tableaux 3 à 8 présentent les résultats moyens des analyses physico-chimiques du lisier brut ainsi que des fractions solide et liquide pour tous les essais, de même que l'efficacité d'extraction pour les principaux éléments. L'efficacité d'extraction des principaux éléments est évaluée par l'équation 1. Les débits massiques ont été estimés à partir de la méthode expliquée au chapitre 4.1.

$$E_{\text{extraction}} = \frac{\left[\left(\dot{M}_{\text{LisierBrut}} \times C_{\text{LisierBrut}} \right) - \left(\dot{M}_{\text{FractionLiquide}} \times C_{\text{FractionLiquide}} \right) \right]}{\left(\dot{M}_{\text{LisierBrut}} \times C_{\text{LisierBrut}} \right)} \times 100 \quad (1)$$

Où :

- $E_{\text{extraction}}$: Efficacité d'extraction des principaux éléments (%)
- $\dot{M}_{\text{LisierBrut}}$: Débit de masse du lisier brut traité (kg h^{-1})
- $C_{\text{LisierBrut}}$: Concentration de l'élément retrouvé dans le lisier brut (mg kg^{-1})
- $\dot{M}_{\text{FractionLiquide}}$: Débit de masse de la fraction liquide rejetée (kg h^{-1})
- $C_{\text{FractionLiquide}}$: Concentration de l'élément retrouvé dans la fraction liquide (mg kg^{-1})

L'efficacité d'extraction exprime indirectement la proportion d'un élément donné qui se retrouvera dans la fraction solide après la séparation du lisier brut. Les résultats des analyses physico-chimiques de tous les éléments sont présentés à l'annexe II.

5.2.1 Lisier de porcs à l'engraissement

Pour l'ensemble des essais sur le lisier de porcs à l'engraissement, la teneur en matières sèches des lisiers traités s'est situé entre 1,8% et 13,1%. La siccité du lisier des élevages en engraissement nourris avec de la moulée produite à la ferme s'est située entre 6 et 13,1% (Tableau 3). Celle des élevages en engraissement nourris avec de la moulée cubée a été de 1,8 à 3,4% (Tableau 4).

Tableau 3: Résultats d'analyses pour les éléments bio-physiques des échantillons de lisier de porcs à l'engraissement nourris avec de la moulée préparée à la ferme

Essais	MS			Masse volumique			DCO		
	LB %	FL %	FS %	LB g/cm^3	FL g/cm^3	FS g/cm^3	LB mg/L	FL mg/L	FS mg/L
497-1	6,8	4,6	37,9	1,008	1,005	nd	nd	nd	nd
497-2	6,5	4,4	37,2	1,018	1,004	nd	nd	nd	nd
497-3	6,4	4,3	36,3	1,019	1,006	nd	nd	nd	nd
497-4	6,3	4,5	35,6	1,006	0,998	nd	nd	nd	nd
512-1	6,7	3,9	38,8	1,030	1,023	nd	nd	nd	nd
512-2	7,3	3,8	39,2	1,027	1,023	nd	nd	nd	nd
540-1	6,2	3,9	42,7	1,025	0,959	nd	89 725	78 525	nd
540-2	6,5	3,9	38,9	1,015	0,943	nd	86 900	78 450	nd
540-3	6,2	3,9	40,5	1,022	0,973	nd	85 775	77 200	nd
540-4	6,1	4,0	33,2	1,021	0,975	nd	83 025	76 825	nd
541-1	6,0	3,8	38,7	1,011	1,000	nd	83 725	75 525	nd
629-1	12,9	8,3	41,0	1,016	0,810	nd	172 500	170 000	nd
629-2	13,1	8,0	39,2	1,000	0,863	nd	172 500	160 000	nd
630-3	12,5	7,7	37,3	0,982	0,849	nd	162 500	150 000	nd

Tableau 4: Résultats d'analyses pour les éléments bio-physiques des échantillons de lisier de porcs à l'engraissement nourris avec de la moulée cubée

Essais	MS			Masse volumique			DCO		
	LB %	FL %	FS %	LB g/cm ³	FL g/cm ³	FS g/cm ³	LB mg/L	FL mg/L	FS Mg/L
588-1	1,8	0,8	33,4	1,006	1,008	nd	22473	15700	nd
588-2	2,8	1,4	29,6	1,010	1,007	nd	38435	24223	nd
588-3	2,4	1,3	28,2	1,009	1,005	nd	33660	21008	nd
645-1	3,3	2,0	30,4	1,016	1,007	nd	44500	28250	nd
649-1	3,4	2,0	33,6	1,018	1,007	nd	43250	31000	Nd

La siccité de la fraction solide produite par le traitement du lisier de porcs à l'engraissement nourris avec de la moulée produite à la ferme a été de 35,6 et 42,7% (Tableau 3). Pour le traitement du lisier de porcs nourris avec de la moulée cubée, la fraction solide générée possédait une siccité de 28,2 à 33,6% (Tableau 4).

La masse volumique de la fraction solide à la sortie du séparateur a été évaluée entre 400 et 600 kg m⁻³ pour le solide issu de porcs alimentés avec de la moulée préparée à la ferme et entre 600 et 800 kg m⁻³ pour ceux alimentés avec de la moulée cubée. De façon générale, le séparateur permet un de réduire la demande chimique en oxygène (DCO) du lisier brut de 7 à 34% .

La centrifugation a permis de retirer entre 33,9 et 53,1% de la matière sèche contenue initialement dans le lisier brut pour les porcs à l'engraissement nourris avec de la moulée produite à la ferme et entre 43,1 et 55% pour le lisier de porcs nourris avec de la moulée cubée (Tableaux 4 et 5).

Tableau 5 : Efficacité de séparation des principaux éléments bio-physiques pour le lisier de porcs à l'engraissement nourris avec de la moulée fabriquée à la ferme

Essais	N	P	K	Ca	Mg	Cu	Zn	MS
	Total %	%	%	%	%	%	%	%
497-1	11,5	68,7	4,6	41,3	85,3	nd	nd	37,3
497-2	15,6	70,7	7,7	41,8	86,3	nd	nd	38,0
497-3	17,0	71,2	7,2	50,7	86,7	nd	nd	37,9
497-4	15,3	70,8	7,8	52,0	86,6	nd	nd	33,9
512-1	11,9	73,2	5,2	61,8	88,5	nd	nd	46,4
512-2	15,1	74,4	6,9	71,3	89,4	nd	nd	53,1
540-1	10,3	64,9	1,0	46,4	79,4	17,0	30,0	40,5
540-2	11,2	67,8	2,1	66,4	81,0	21,4	36,3	44,8
540-3	12,7	66,4	2,5	56,4	80,3	21,6	35,5	43,3
540-4	14,9	66,9	7,9	52,7	80,6	22,1	37,2	40,4
541-1	14,4	67,9	7,0	61,4	80,7	25,5	36,5	42,3
629-1	17,3	64,4	10,3	37,4	86,6	17,1	13,2	46,0
629-2	21,0	69,0	13,6	41,4	91,3	21,6	18,9	49,6
630-3	22,2	71,1	21,6	43,8	89,9	30,8	26,2	48,9

Tableau 6: Efficacité de séparation des principaux éléments bio-physiques pour le lisier de porcs à l'engraissement nourris avec de la moulée cubée

	N	P	K	Ca	Mg	Cu	Zn	MS
	Total							
Essais	%	%	%	%	%	%	%	%
588-1	27,6	37,8	7,6	47,8	40,6	40,7	49,4	55,0
588-2	27,8	56,8	7,6	44,1	65,8	38,2	42,8	53,1
588-3	33,6	55,6	12,3	47,2	62,2	43,7	47,3	53,7
645-1	22,6	65,7	6,0	45,2	77,2	26,4	33,3	43,1
649-1	21,3	71,6	4,5	63,5	80,4	30,0	40,8	44,7

L'efficacité d'extraction du phosphore lors du traitement du lisier de porcs à l'engraissement nourris avec de la moulée préparée à la ferme a été de 64,4 à 74,4% (Tableau 5). Pour les essais sur le lisier de porcs à l'engraissement nourris avec de la moulée cubée, ces efficacités ont été de 37,8 à 71,6% (Tableau 6). Ces mêmes tableaux indiquent également des efficacités d'extraction pour l'azote total de 10,3 à 22,2% pour les porcs nourris avec de la moulée préparée à la ferme et entre 21,3 et 33,6% les porcs à l'engraissement nourris avec de la moulée cubée.

5.2.2 Lisier issu d'une maternité avec moulée préparée à la ferme

Nous avons procédé à des essais sur du lisier provenant d'une maternité pour des porcs alimentés avec de la moulée fabriquée à la ferme. Quoique moins nombreux, les résultats obtenus lors de ces essais démontrent qu'il est possible de traiter efficacement du lisier de maternité avec le séparateur décanteur-centrifuge. Les tableaux 7 et 8 présentent les résultats d'analyses physico-chimiques du lisier brut et des fractions solide et liquide.

Tableau 7: Résultats d'analyses pour les éléments bio-physiques des échantillons de lisier de porcs à la maternité nourris avec de la moulée fabriquée à la ferme

Essais	MS			Densité			DCO		
	LB	FL	FS	LB	FL	FS	LB	FL	FS
	%	%	%	g/cm ³	g/cm ³	g/cm ³	mg/L	mg/L	mg/L
547-1	1,4	1,0	46,3	1,004	1,007	nd	22 075	18 075	nd
554-1	2,0	1,5	33,8	1,016	1,012	nd	20 775	19 425	nd
560-1	1,7	1,1	34,9	1,014	1,010	nd	nd	nd	nd
560-2	1,9	1,2	30,2	1,012	1,006	nd	nd	nd	nd

Tableau 8: Efficacité de séparation des principaux éléments bio-physiques pour le lisier de porcs à la maternité nourris avec de la moulée fabriquée à la ferme

	N _{Total}	P	K	Ca	Mg	Cu	Zn	MS
Essais	%	%	%	%	%	%	%	%
547-1	7,3	54,3	1,7	36,6	65,3	11,7	38,3	25,4
554-1	11,6	68,1	2,5	43,9	83,3	30,9	31,4	27,0
560-1	11,8	68,1	2,1	48,8	82,0	41,1	33,1	36,7
560-2	12,1	69,6	4,1	50,8	84,0	35,8	31,7	38,7

Pour cette entreprise, la teneur en matières sèches du lisier brut des élevages à la maternité nourris avec de la moulée fabriquée à la ferme a été de 1,4 à 2% (Tableau 7). Un abattement moyen de la DCO de 12% dans la fraction liquide a été obtenu. L'efficacité d'extraction du

phosphore lors du traitement du lisier de porcs à la maternité a été de 54,3 à 69,6% (Tableau 8). Ce même tableau indique également une efficacité d'extraction pour l'azote total de près de 7,3 à 12,1%. Ces résultats doivent cependant être pris avec prudence puisqu'ils ont été tirés d'un nombre limité d'essais chez une seule entreprise.

5.2.3 Courbe granulométrique des particules de matières solides

Les courbes granulométriques des particules retrouvées dans les différentes fractions (brut, liquide et solide) ont été obtenus à partir lisier de porcs à l'engraissement nourris avec de la moulée préparée à la ferme et avec de la moulée cubée pour une gamme de matières sèches allant de faible à élevée. De façon générale, les résultats d'analyses effectuées nous indiquent que le lisier brut est composé de particules ayant un diamètre qui se situe entre 2 et 3000 microns (Figure 11). La fraction liquide générée suite à la centrifugation du lisier brut contient des particules inférieures à 30 microns (Figure 12). Cette observation a pour corollaire les résultats sur la fraction solide remise en solution (Figure 13) qui indiquent clairement que le séparateur décanteur-centrifuge transfère la majorité des particules plus grandes que 30 microns dans la fraction solide. Ceci est corroboré par les observations réalisées par Moller *et al.* (2002). Ces derniers ont démontré que le séparateur décanteur-centrifuge permettait de séparer la totalité des particules supérieures à 25 microns.

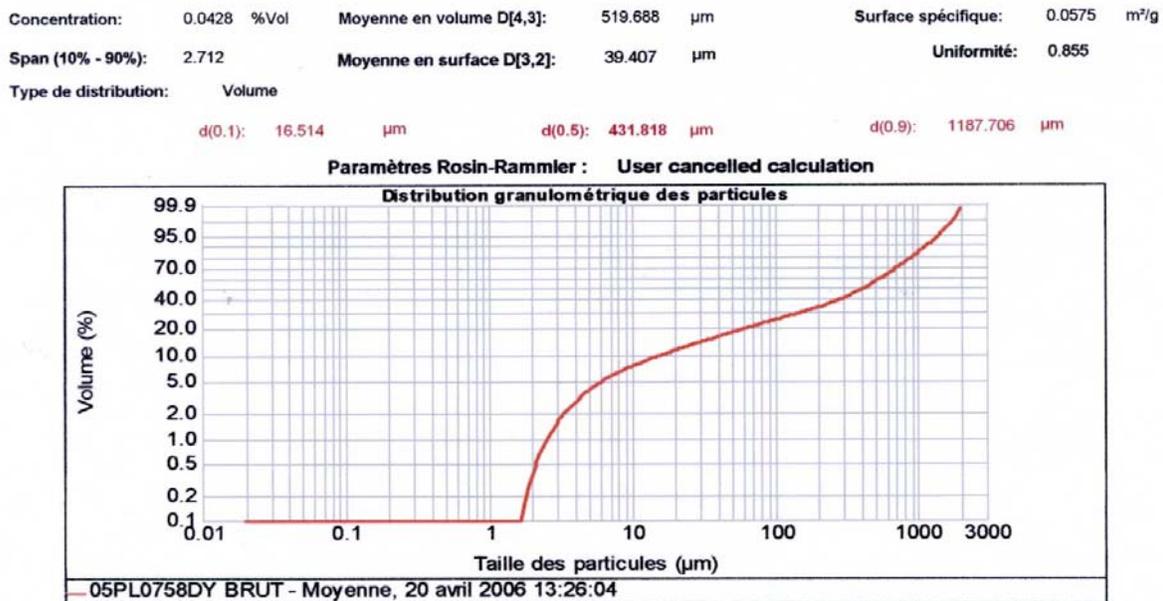


Figure 11: Courbe type représentant la répartition granulométrique d'un lisier brut pour le porc à l'engraissement

Concentration: 0.0037 %Vol Moyenne en volume D[4,3]: 3.388 µm Surface spécifique: 8.05 m²/g
 Span (10% - 90%): 7.435 Moyenne en surface D[3,2]: 0.281 µm Uniformité: 2.62
 Type de distribution: Volume
 d(0.1): 0.104 µm d(0.5): 1.215 µm d(0.9): 9.136 µm

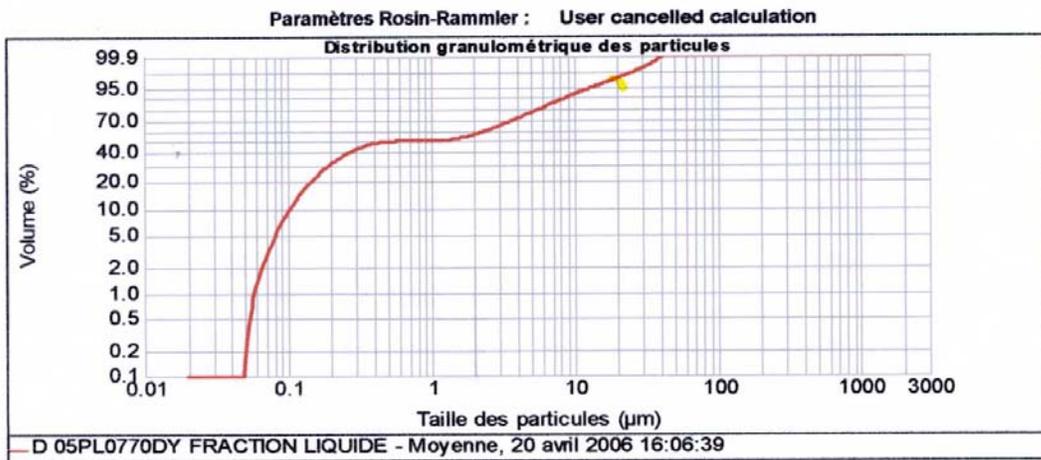


Figure 12: Courbe type représentant la répartition granulométrique d'une fraction liquide pour le porc à l'engraissement

Concentration: 0.0759 %Vol Moyenne en volume D[4,3]: 555.967 µm Surface spécifique: 0.0281 m²/g
 Span (10% - 90%): 2.440 Moyenne en surface D[3,2]: 80.512 µm Uniformité: 0.751
 Type de distribution: Volume
 d(0.1): 39.458 µm d(0.5): 476.927 µm d(0.9): 1203.292 µm

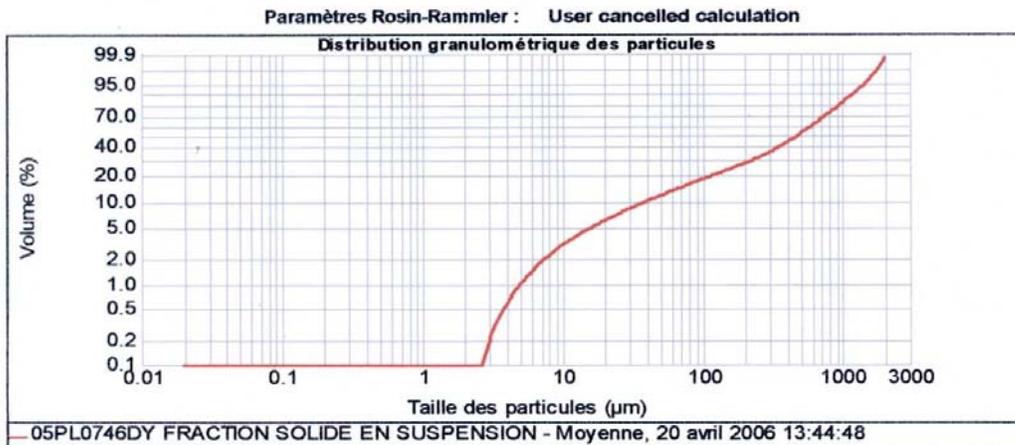


Figure 13: Courbe type représentant la répartition granulométrique d'une fraction solide reconstituée de porc à l'engraissement

5.3 Performance des méthodes terrains employées lors des évaluations de la matière sèche et du phosphore

Pour obtenir de l'information sur les performances du séparateur et ainsi arriver rapidement à un ajustement optimal, nous avons utilisé deux méthodes d'analyse *in situ* afin de déterminer le contenu en matière sèche et en phosphore dans le lisier brut, dans la fraction liquide et dans la fraction solide. La validation de ces techniques d'évaluation simples permettra aux futurs opérateurs de séparateurs d'ajuster et de vérifier les équipements sans avoir à attendre les résultats d'analyses d'échantillons expédiés au laboratoire. Les figures 14 et 15 montrent respectivement la précision des valeurs obtenues lors de l'évaluation de la siccité du lisier brut et des fractions solide et liquide.

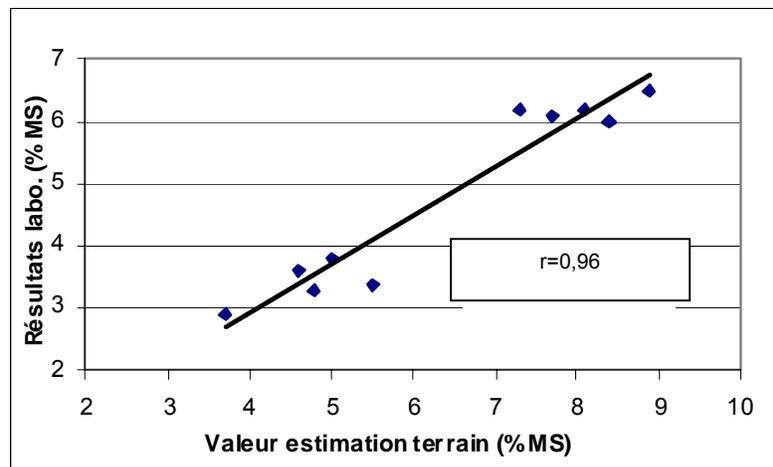


Figure 14: Corrélation des résultats entre les valeurs terrain et les analyses du laboratoire pour la matière sèche du lisier brut et de la fraction liquide

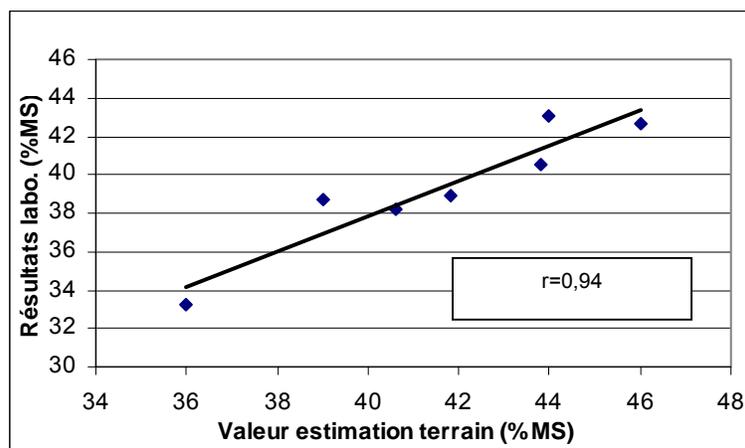


Figure 15: Corrélation des résultats entre les valeurs terrain et les analyses du laboratoire pour la siccité de la matière sèche de la fraction solide

La méthode terrain utilisée pour l'évaluation de la matière sèche par micro-ondes surévalue de 25% les valeurs par rapport aux résultats des analyses du laboratoire pour le lisier brut et pour la fraction liquide (Figure 14). De même, pour la fraction solide, les valeurs obtenues par la méthode d'évaluation terrain surestiment de 5% les résultats du laboratoire (Figure 15).

Puisque le phosphore est également un paramètre important pour l'ajustement du séparateur, un réflectomètre (EMD Chemicals, RQFlex) a été utilisé pour l'évaluation terrain du P_{total} contenu dans le lisier brut et dans la fraction liquide. La Figure 16 présente la relation utilisée pour corrélérer les valeurs terrains obtenues sous la forme de P_{soluble} (PO_4 dissous) avec les valeurs laboratoires obtenues sous la forme de P_{total} .

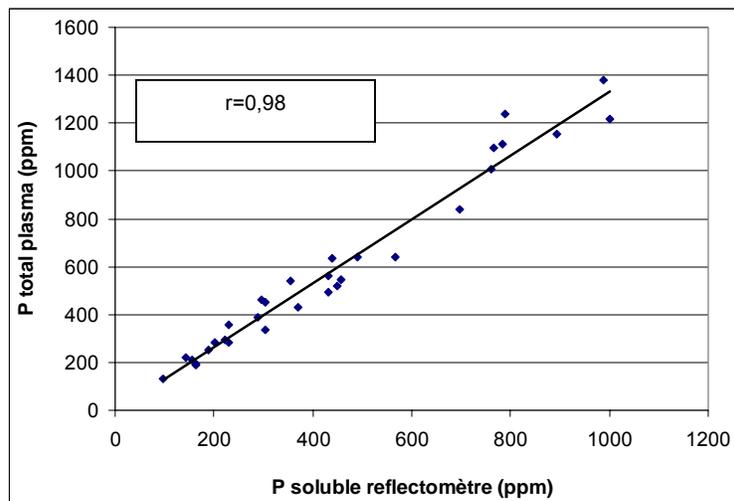


Figure 16: Corrélation des résultats entre les valeurs terrains et les analyses du laboratoire pour la concentration de P_{total} pour le lisier brut et pour la fraction liquide

5.4 Discussion sur les résultats d'efficacité d'extraction

Les résultats présentés dans les tableaux précédents montrent une grande variabilité quant aux efficacités d'extraction obtenues. Cette variabilité nous incite à présenter des relations entre certains paramètres caractérisant le lisier brut à traiter.

5.4.1 Extraction du phosphore

Le graphique de la Figure 17 montre les résultats des efficacités d'extraction obtenus lors de tous les essais de séparation de lisier en provenance des porcs à l'engraissement et de maternité en fonction de la siccité du lisier brut. L'observation de ce graphique montre clairement que, pour le porc à l'engraissement, le séparateur décanteur-centrifuge permet une efficacité d'extraction du phosphore avoisinant 70% à partir de lisier ayant plus de 3% de matières sèches. Cette concentration en matières sèches semble être le point critique pour une efficacité optimale de fonctionnement.

Le graphique de la Figure 17 montre également qu'il est possible d'atteindre une efficacité d'extraction intéressante pour du lisier de maternité. Malgré un nombre restreint d'essais, on

observe l'influence du taux initial de matières sèches dans le lisier à traiter. Dans ce cas, on remarque un point critique avoisinant 1,7% de matières sèches.

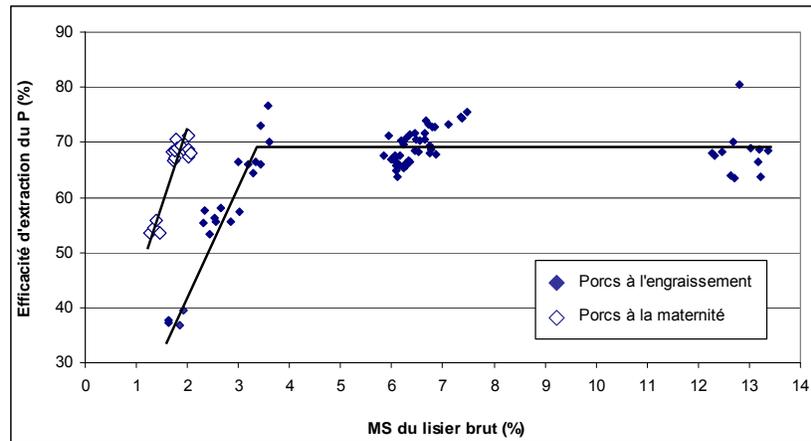


Figure 17: Efficacités d'extraction du phosphore obtenues lors des essais de séparation pour le lisier de porcs à l'engraissement et de maternité en fonction du taux de matières sèches du lisier brut

Fort de ce constat, il apparaît primordial de procéder à des pratiques efficaces de gestion de l'eau qui assurent une concentration plus élevée en matières sèches dans le but d'optimiser la gestion du procédé de traitement.

5.4.2 Extraction de la matière sèche

Contrairement à ce qui a été observé pour le phosphore, il ne semble pas y avoir de relation entre la siccité initiale du lisier et l'efficacité d'extraction de la matière sèche. Le graphique de la Figure 18 montre une grande variation des résultats d'extraction et ce, peu importe la siccité du lisier brut. On peut y observer que, pour le lisier de porcs à l'engraissement, l'efficacité d'extraction de la matière sèche oscille autour de 45% avec un écart-type de 6,3%. De même, pour le lisier de porcs à la maternité, cette efficacité se situe en moyenne à près de 32% avec un écart type de 6,7%. À partir de ces observations, il semble difficile de déterminer l'élément qui influence les résultats de séparation de la matière sèche.

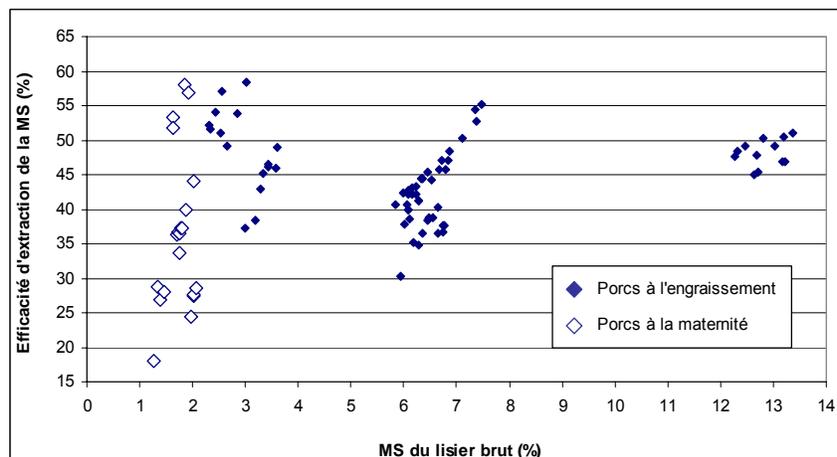


Figure 18: Efficacités d'extraction de la matière sèche obtenue lors des essais de séparation pour le lisier de porcs à l'engraissement et à la maternité en fonction des taux de matière sèche du lisier brut

5.4.3 Extraction de l'azote

Puisque l'azote ammoniacal est entièrement sous forme dissoute, sa concentration retrouvée dans la fraction liquide est généralement équivalente à celle retrouvée dans le lisier brut. Pour sa part, l'azote organique se retrouvant dans la fraction liquide sera équivalente à 85% de celle du lisier brut (Figure 19).

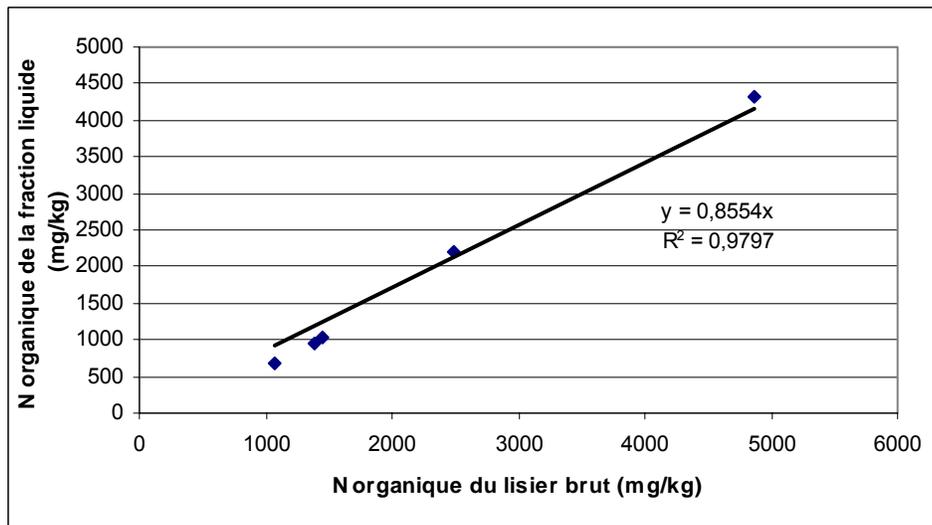


Figure 19: Concentration en azote organique de la fraction liquide en fonction de la concentration du N organique du lisier brut

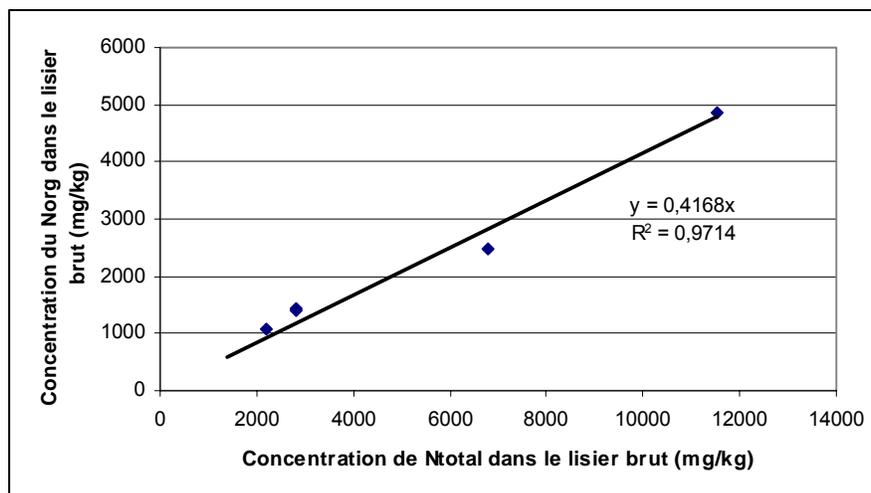


Figure 20: Concentration en azote organique de la fraction liquide en fonction de la concentration du N total du lisier brut

Puisque l'azote organique constitue généralement 42% de l'azote total du lisier brut (Figure 20), la concentration en azote total de la fraction liquide sera équivalente à 94% de celle du lisier brut (

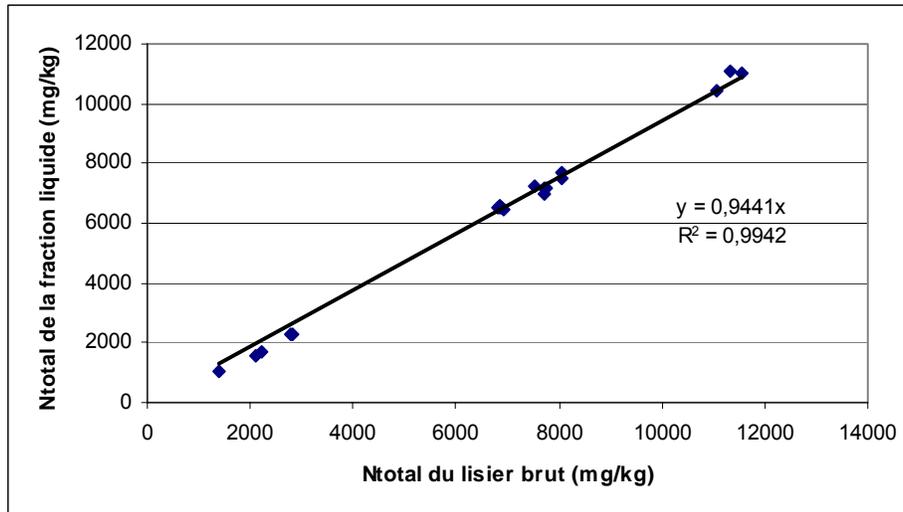


Figure 21). Cette valeur constitue la proportion d'azote organique et d'azote ammoniacal transférée vers la fraction liquide.

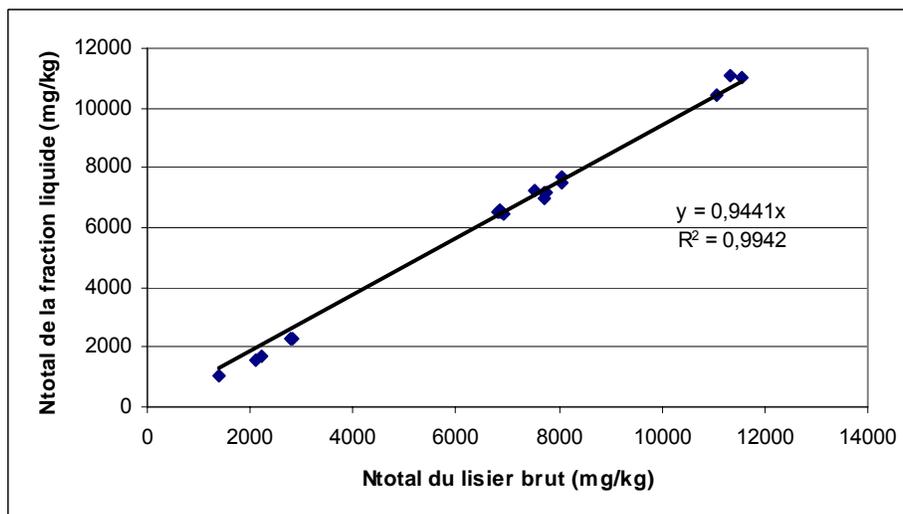


Figure 21: Concentration de azote total de la fraction liquide en fonction de la concentration en azote total du lisier brut

Un ajustement moyen de l'anneau liquide permet de transférer de 91 à 93% de la masse du lisier brut vers la fraction liquide. Ainsi pour un même ajustement, l'efficacité d'extraction de l'azote se situera entre 12 et 15% comme le démontrent les exemples de l'annexe III.

5.4.4 Extraction du potassium

En raison la grande solubilité du potassium, la concentration de cet élément retrouvée dans la fraction liquide est équivalente à celle du lisier brut (Figure 22). L'efficacité d'extraction du potassium sera donc directement liée à la quantité d'eau transférée du lisier brut vers la fraction solide. Dans le cas d'un ajustement moyen de l'anneau liquide, cette efficacité se situera entre 5 et 7% comme le démontrent les exemples de l'annexe III.

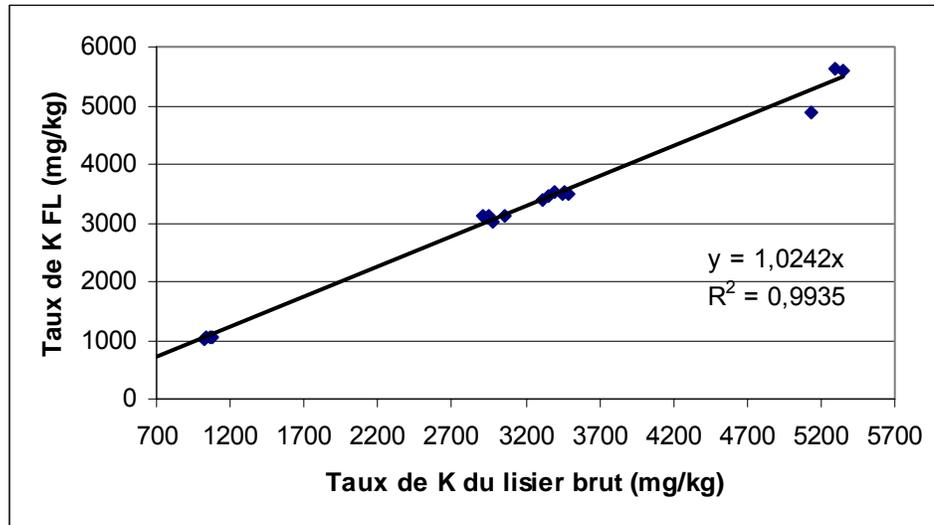


Figure 22: Concentration en potassium de la fraction liquide en fonction de la concentration en potassium du lisier brut

5.4.5 Impact de l'ajustement de l'anneau liquide sur l'efficacité d'extraction du phosphore et de la matière sèche ainsi que sur la siccité de la fraction solide

La hauteur de l'anneau liquide est un des paramètres d'ajustement de la centrifugeuse. Plus le niveau de l'anneau liquide est mince, plus l'effet d'assèchement de la fraction solide sera important. Par contre, un niveau de liquide élevé permet généralement une efficacité d'extraction supérieure des éléments contenus dans l'effluent mais, en contre-partie, produit une fraction solide nettement plus humide. La Figure 23 décrit bien ce phénomène. Elle montre l'impact de l'ajustement sur l'efficacité d'extraction du phosphore, de l'azote total, du potassium, de la matière sèche, ainsi que sur la siccité de la fraction solide générée. Ce graphique présente les résultats obtenus lors d'une campagne d'échantillonnage pour une entreprise donnée suite à la centrifugation d'un lisier de porcs à l'engraissement ayant un taux de matières sèches constant.

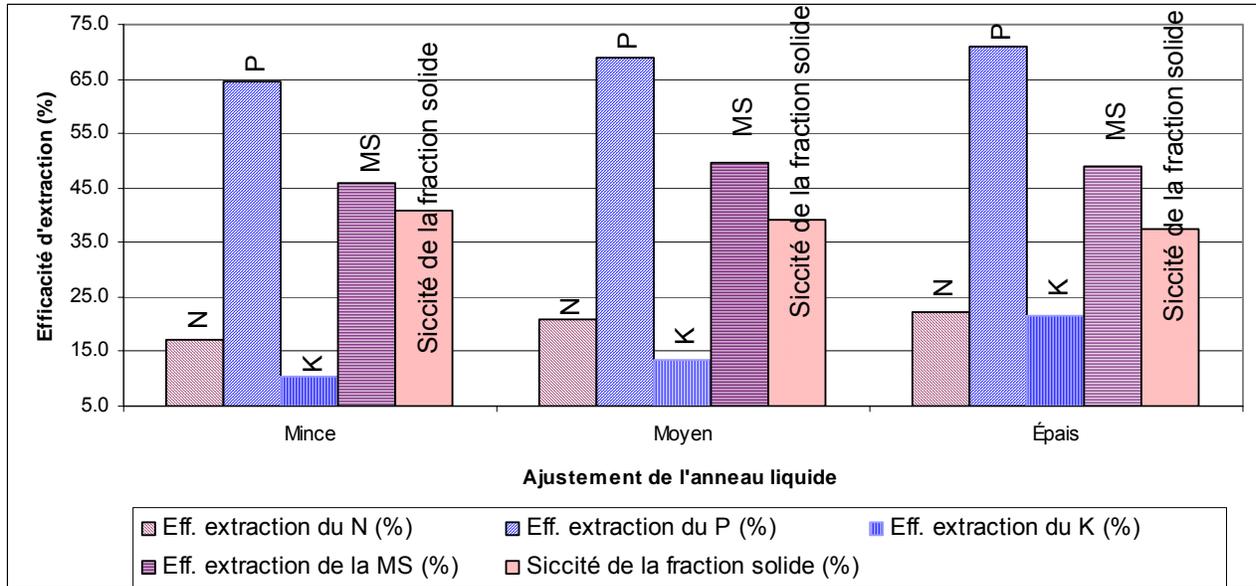


Figure 23: Impact de l'ajustement de l'anneau sur l'efficacité d'extraction du phosphore et de la matière sèche ainsi que sur la siccité de la fraction solide

On observe, tel que mentionné, une augmentation de l'efficacité d'extraction du phosphore, du potassium et de l'azote total avec l'augmentation du niveau de l'anneau liquide. Cette variation du niveau liquide a également pour conséquence la diminution de la siccité de la fraction solide. L'efficacité d'extraction des éléments solubles comme l'azote ammoniacal et le potassium est donc directement proportionnelle à la teneur en eau de la fraction solide.

La Figure 23 montre une augmentation du taux de capture de la matière sèche jusqu'à un certain ajustement du niveau liquide au-delà duquel il tend à plafonner.

6 Élaboration du modèle prévisionnel

Les résultats obtenus au cours des essais ont conduit à l'élaboration d'un modèle empirique permettant d'évaluer les paramètres de fonctionnement du séparateur décanteur-centrifuge testé. Le modèle tente de préciser les différents paramètres physico-chimiques basés sur le taux de matières sèches d'un lisier de porc à l'engraissement nourris avec de la moulée fabriquée à la ferme ou avec de la moulée commerciale. Ces évaluations sont basées sur les résultats des essais effectués avec le décanteur-centrifuge Asserva-300. Cette section traite de chacun des paramètres d'évaluation du modèle. L'annexe III présente le résultat d'un calcul obtenu avec le modèle prévisionnel développé.

Puisqu'il s'agit d'un modèle empirique, celui-ci ne permet pas de prévoir les résultats pour les élevages de maternité puisque davantage de mesures seraient nécessaires pour établir un modèle précis pour ces conditions. Toutefois, les résultats montrés au chapitre 5.2.2 peuvent servir de valeurs guides pour le dimensionnement des équipements.

6.1 Débit de lisier traité : impact de la siccité du lisier brut sur le débit maximal de fonctionnement

La capacité hydraulique théorique du séparateur décanteur-centrifuge est déterminée par le fabricant. Elle est représentée par le volume maximal d'eau que l'appareil peut traiter par heure. Le débit hydraulique théorique du séparateur testé est de $5 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. La capacité réelle de traitement est néanmoins fonction de l'état du liquide brut à traiter et doit être vérifiée pour chaque produit liquide à centrifuger. En ce qui concerne le lisier de porc, le débit traité est de deux à quatre fois inférieur à la capacité hydraulique citée par le fabricant. Les évaluations concernant l'estimation des débits traités sont basées sur les résultats des essais sur le lisier de porcs à l'engraissement pour un ajustement moyen du séparateur décanteur-centrifuge et pour des courants de fonctionnement normaux situés entre 7 et 8 A inclusivement. La figure 24 illustre la relation trouvée entre la siccité du lisier brut et le débit maximal qu'il est possible de traiter avec le séparateur décanteur-centrifuge.

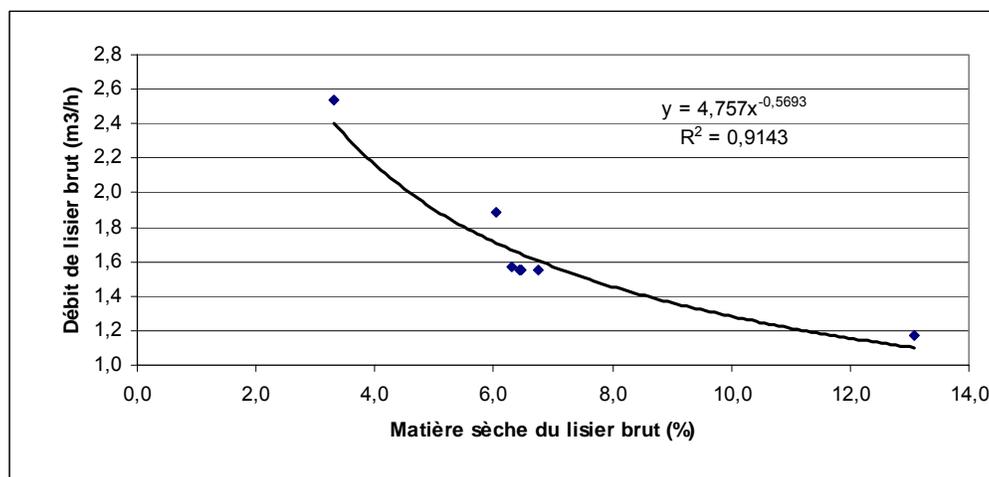


Figure 24: Relation entre la siccité du lisier brut et le débit traité

Ainsi pour une même puissance d'opération, plus le lisier brut aura une siccité élevée, plus faible sera le débit à traiter. Ceci est causé principalement par une quantité plus importante de matières sèches transitant dans le séparateur ce qui nécessite plus d'énergie pour déshydrater ces dernières. Nous verrons plus loin les conséquences de ce constat sur le nombre de porcs-emplacements dont le lisier pourra être traité par le séparateur décanteur-centrifuge

6.2 Débit de fraction liquide rejetée

La quantité de fraction liquide extraite du procédé est déterminée par la relation impliquant le débit de lisier brut traité (Figure 25). Les évaluations concernant l'estimation de la quantité de fraction liquide rejetée sont basées sur les résultats des essais sur le lisier de porcs à l'engraissement pour un ajustement moyen du décanteur-centrifuge et pour des courants de fonctionnement normaux situés entre 7 et 8 A inclusivement. Tel que ces résultats l'indiquent, généralement plus de 90% du volume de liquide traité par le décanteur-centrifuge est retourné à la fosse de stockage extérieure.

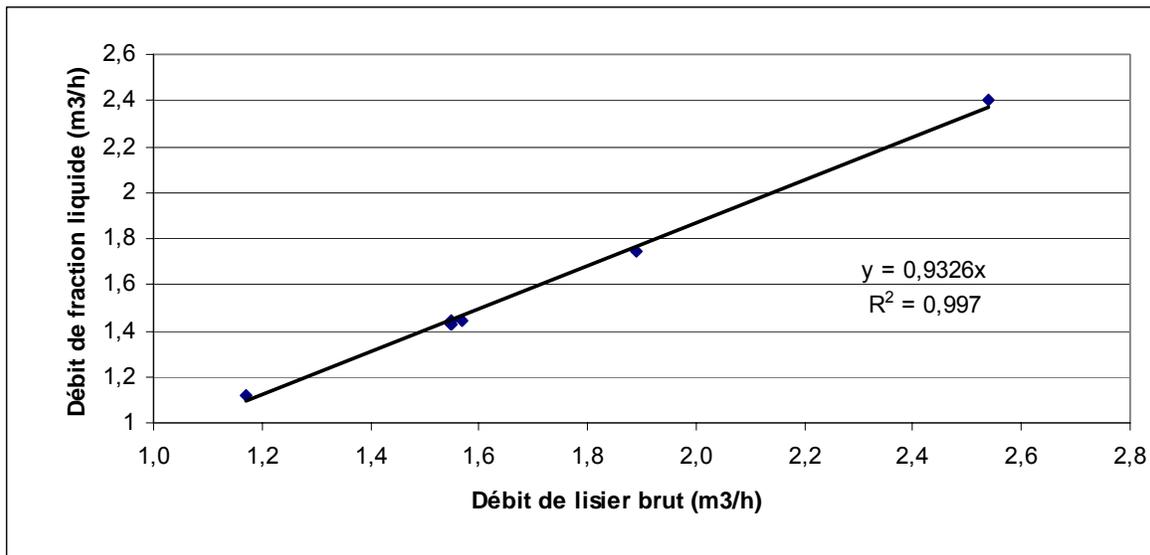


Figure 25: Débit de fraction liquide rejetée en fonction du débit de lisier brut traité par le séparateur décanteur-centrifuge

6.3 Impact de la siccité du lisier brut sur la siccité de la fraction liquide rejetée

La Figure 26 illustre la relation empirique trouvée entre la siccité du lisier brut et la siccité de la fraction liquide rejetée par le séparateur décanteur-centrifuge lors des essais.

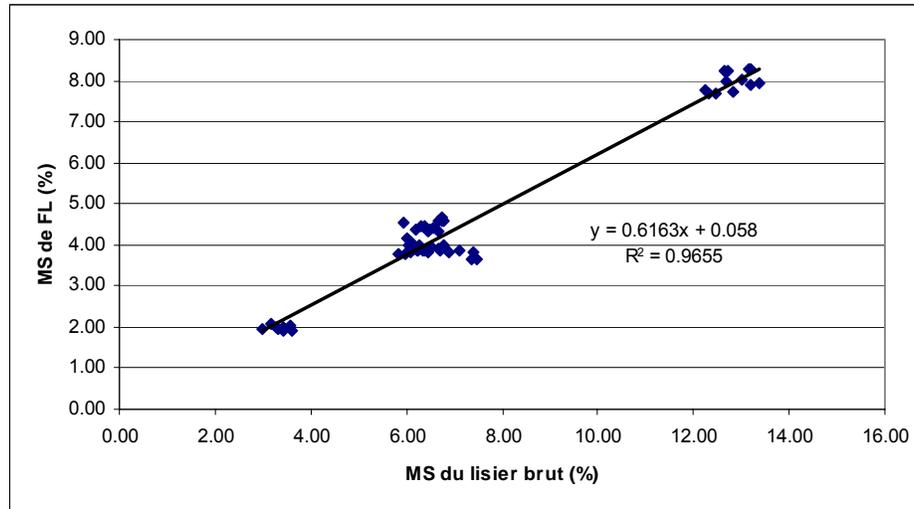


Figure 26: Taux de matières sèches de la fraction liquide en fonction du taux de matières sèches du lisier brut

De façon générale, la siccité de la fraction liquide est d'environ 60% de celle du lisier brut. Toutefois, il s'agit essentiellement des particules les plus petites. Le chapitre 5.2.3 traite de la granulométrie des particules retrouvées dans les trois fractions.

6.4 Siccité de la fraction solide

Pour les fins de la modélisation, l'équation 2 présente la relation utilisée pour établir la siccité de la fraction solide. Celle-ci est déduite du débit de masse, de la siccité du lisier brut et de la fraction liquide (Figure 25).

$$MS_{\text{FractionSolide}} = \frac{[(M_{\text{LisierBrut}} \times MS_{\text{LisierBrut}}) - (M_{\text{FractionLiquide}} \times MS_{\text{FractionLiquide}})]}{M_{\text{FractionSolide}}} \quad (2)$$

Où :

$MS_{\text{FractionSolide}}$: Taux de matières sèches de la fraction solide (%)
$M_{\text{LisierBrut}}$: Débit de masse du lisier brut traité ($\text{m}^3 \text{h}^{-1}$)
$MS_{\text{LisierBrut}}$: Taux de matières sèches du lisier brut (%)
$M_{\text{FractionLiquide}}$: Débit de masse de la fraction liquide rejetée ($\text{m}^3 \text{h}^{-1}$)
$MS_{\text{FractionLiquide}}$: Taux de matières sèches de la fraction liquide (%)
$M_{\text{FractionSolide}}$: Débit de masse de la fraction solide rejeté ($\text{m}^3 \text{h}^{-1}$)

6.5 Masse volumique des fractions brut, liquide et solide

La relation empirique, telle que développée par Poirier (2005), permet une première approximation pour évaluer la masse volumique du lisier brut. Cette relation est décrite à l'équation 3.

$$MV_{\text{Lisier Brut}} = \frac{(MS_{\text{Lisier Brut}} + 209,96)}{0,2098} \quad (3)$$

Où :

$MV_{\text{Lisier Brut}}$: Masse volumique du lisier brut (g L^{-1})

La masse volumique de la fraction liquide produite avec du lisier brut ayant une siccité inférieure à 5 % tend généralement vers celle de l'eau soit 1000 g L^{-1} . Pour les lisiers brut ayant une siccité comprise entre 5 et 10% on pourra utiliser une valeur de 1010 g L^{-1} pour établir la masse volumique de la fraction liquide.

La masse volumique de la fraction solide à la sortie du séparateur a été évaluée entre 400 et 600 kg m^{-3} pour le solide issu de lisier de porcs alimentés avec de la moulée préparée à la ferme et entre 600 et 800 kg m^{-3} pour celui de lisier de porcs alimentés avec de la moulée commerciale.

6.6 Évaluation de la capacité de traitement maximal du séparateur décanteur-centrifuge (nombre de porcs-emplacements traités)

À partir des travaux réalisés par Seydoux *et al.* (2005), il est possible d'établir une relation entre la teneur en matières sèches du lisier brut et le volume journalier de lisier généré par des porcs à l'engraissement (Figure 27).

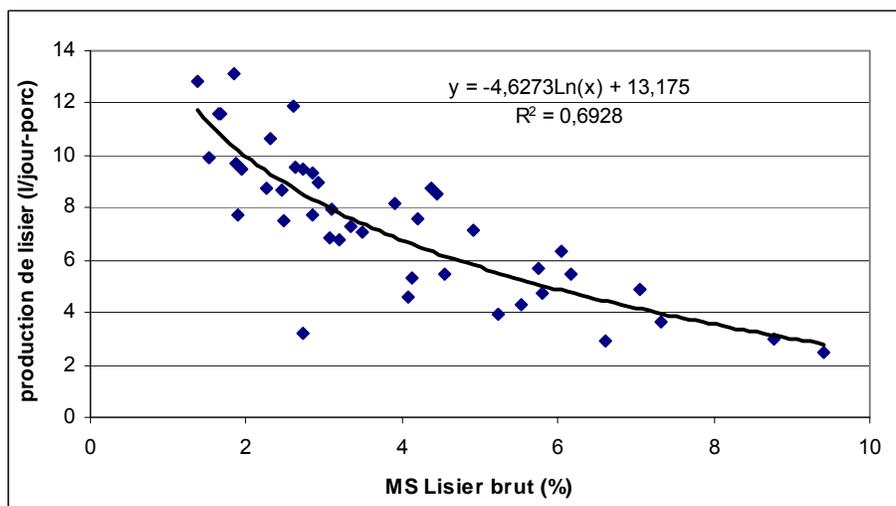


Figure 27: Estimation de la production journalière de lisier pour les porcs à l'engraissement en fonction du taux de matières sèches du lisier brut, (Seydoux *et al.* (2005))

Grâce à cette relation et celle établie entre la siccité du lisier brut et le débit traité (Figure 24), il est possible d'estimer avec l'équation 4 le nombre de porcs-emplacements maximal que l'appareil peut traiter.

$$N_{pe} = \frac{Q_{LisierBrut} \times Hr}{VL} \quad (4)$$

Et :

$$VL = -4,6273 * \ln(MS_{LisierBrut}) + 13,175$$

Et :

$$Q_{LisierBrut} = 4,75 MS_{LisierBrut}^{-0,5693}$$

Où :

N_{pe}	: Nombre de porcs-emplacements maximal pouvant être traités
$Q_{LisierBrut}$: Débit du lisier brut traité par le décanteur ($L h^{-1}$)
Hr	: Nombre d'heure de fonctionnement du décanteur par jour (heure)
VL	: Production quotidienne de lisier ($L jour^{-1} porc^{-1}$)
$MS_{LisierBrut}$: Siccité du lisier brut (%)

La Figure 28 présente graphiquement un exemple de résultats pour un décanteur fonctionnant 8 heures par jour et où la capacité de traitement en nombre de porcs-emplacements évolue avec l'augmentation de la teneur en matières sèches du lisier brut. Cette même figure démontre toute l'importance d'une bonne gestion de l'eau pour obtenir des performances optimales avec le séparateur. Une gestion de l'eau inefficace se traduit par un lisier ayant une faible siccité. Bien que l'appareil puisse traiter d'avantage de lisier ayant une siccité basse, la quantité de matériel à pomper est telle qu'il faut diminuer le nombre d'animaux pour traiter tout le volume généré pendant une période de temps donnée.

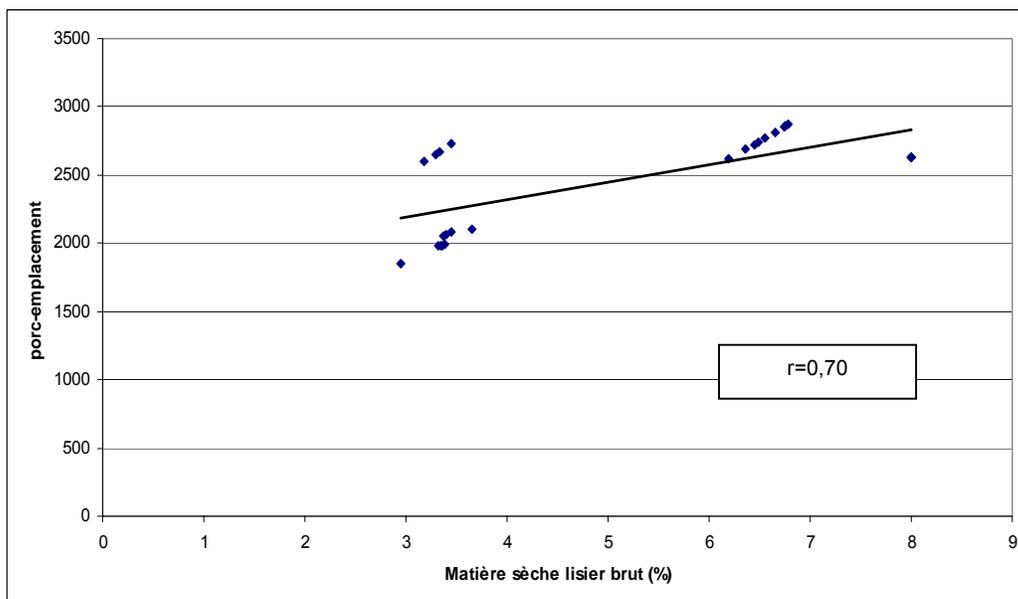


Figure 28: Capacité maximale de traitement du décanteur-centrifuge (en nb. de porcs-emplacements) en fonction de la matière sèche du lisier brut pour 8 heures de traitement journalier

6.7 Efficacité d'extraction des principaux éléments

6.7.1 Concentration d'azote total retrouvée dans la fraction liquide

La concentration en azote total retrouvée dans la fraction liquide est établie empiriquement à partir de la relation démontrée au graphique de la Figure 29. Cette relation tient compte de la concentration en azote total du lisier brut.

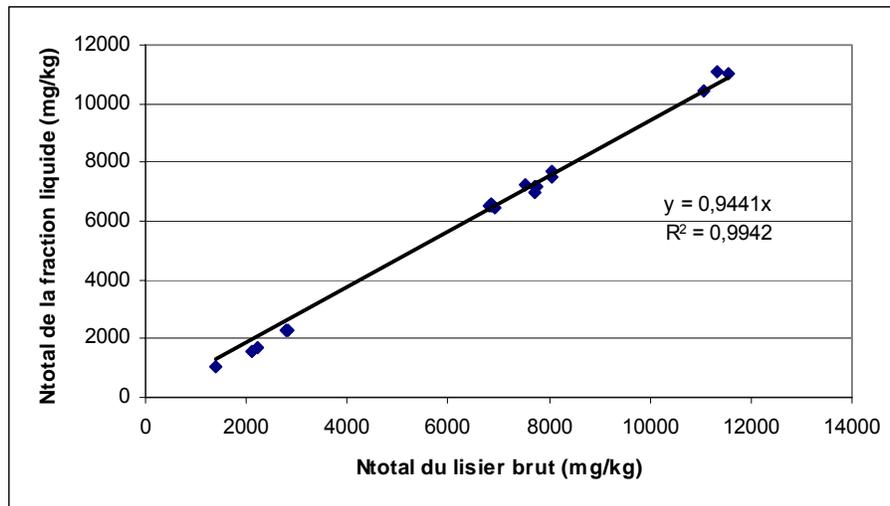


Figure 29: Concentration de N_{total} de la fraction liquide en fonction de la concentration en N_{total} du lisier brut

6.7.2 Concentration en phosphore total retrouvée dans la fraction liquide

La concentration en phosphore total retrouvée dans la fraction liquide est établie empiriquement suivant la relation démontrée à la Figure 30. Cette relation tient compte de la concentration en phosphore total du lisier brut.

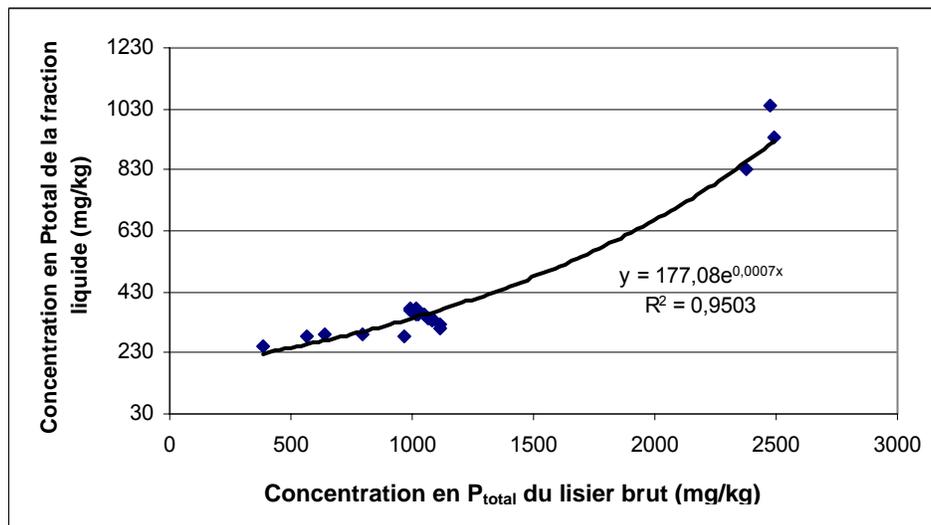


Figure 30: Concentration en P_{total} de la fraction liquide en fonction de la concentration en P_{total} du lisier brut

6.7.3 Concentration en potassium total retrouvée dans la fraction liquide

La concentration de potassium total retrouvée dans la fraction liquide est établie empiriquement suivant la relation démontrée à la Figure 31. Cette relation tient compte de la concentration en potassium total du lisier brut.

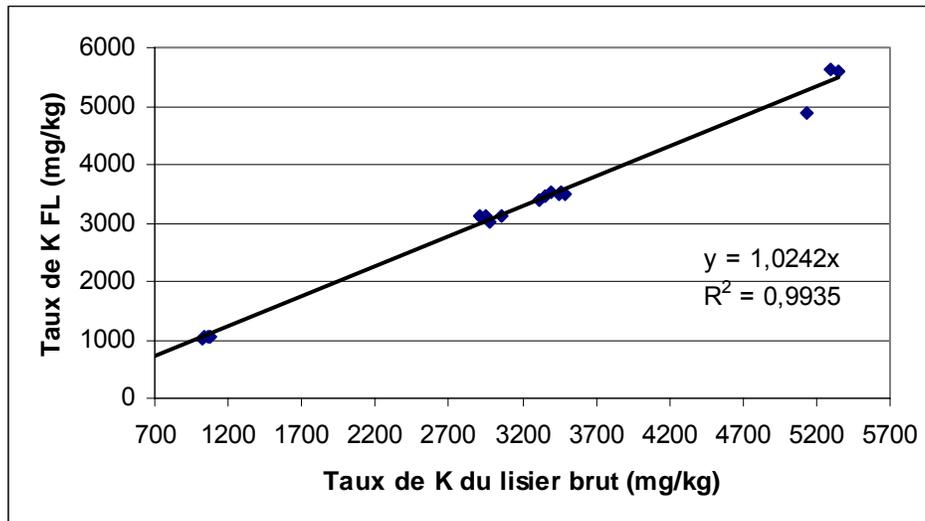


Figure 31: Concentration de K_{total} de la fraction liquide en fonction de la concentration en K_{total} du lisier brut

6.7.4 Utilisation du modèle prévisionnel

À partir des relations empiriques tirées des résultats d'expérimentation, un modèle prévisionnel a été construit pour permettre de déduire les masses transitées ainsi que les efficacités d'extraction obtenues suite à la centrifugation pour les éléments majeurs. Cet outil d'aide à la décision permet de réaliser des scénarios pour la disposition des différentes fractions ainsi que le dimensionnement de certains équipements nécessaires au procédé.

Mise en garde : Il est important de noter que le modèle repose sur un ajustement intermédiaire de l'anneau liquide. Ce dernier a une incidence sur le taux d'assèchement de la fraction solide ainsi que sur le débit d'alimentation du séparateur. En conséquence, les résultats des estimations obtenus avec le modèle peuvent sous-estimer les performances réelles du séparateur, notamment en ce qui concerne la siccité de la fraction solide.

Le modèle exige la saisie de certaines valeurs pour en déduire les résultats. Ces valeurs sont :

- Le nombre de porcs-emplacements réels;
- Le nombre d'élevages /année (jour);
- Le nombre de jour de vide sanitaire (jour);
- La siccité du lisier brut (%);
- La masse volumique du lisier brut (kg m^{-3});
- La masse volumique de la fraction solide (estimée) (kg m^{-3});

- La masse volumique de la fraction liquide (estimée) (kg m^{-3});
- La concentration des éléments N_{total} , P_{total} et K_{total} du lisier brut (kg t^{-1});
- La hauteur de la fraction solide pour son entreposage sur une plate-forme (m).

L'annexe III montre les résultats d'une évaluation obtenus à l'aide du modèle prévisionnel utilisé pour simuler le cas d'une entreprise de 2 000 porcs-emplacements pour un lisier brut ayant une siccité de 7 et de 3,3%.

6.8 Potentiel de valorisation de la fraction liquide

La centrifugation à haute vitesse affecte peu la composition en éléments dissous de la partie liquide du lisier. Ainsi, les contenus en potassium et en azote ammoniacal sont peu affectés par la séparation mécanique étant donné qu'ils sont en quasi totalité sous forme dissoute. Seule la partie organique de l'azote total se retrouvera en partie dans la fraction solide, donnant une fraction liquide qui contient environ 25% moins d'azote organique que dans le lisier brut. De même, puisque le phosphore a peu tendance à se retrouver sous forme dissoute dans le lisier, seulement 35% du phosphore du lisier brut se retrouvera dans la fraction liquide. Conséquemment, la fraction liquide, qui demeure un engrais composé, est simplement un lisier passée d'une composition N-P-K à principalement N-K. Elle pourra être valorisée à la ferme, notamment sur les surfaces en maïs-grain exigeantes en N, mais également sur les cultures de rotation. Cependant, une attention spéciale devra être portée sur le déséquilibre créé entre les contenus en potassium et ceux en calcium et magnésium. En effet, à l'opposé du contenu en potassium qui demeure sensiblement inchangé, les contenus en calcium et magnésium de la fraction liquide ne représentent plus que 49% et 25% de ceux du lisier brut. Le ratio $K/(Ca + Mg)$ s'élève ainsi de 1,13, dans le lisier brut, à 2,7 dans la fraction liquide. Dans les sols pauvres en ces éléments au départ, ou sur les sols bien pourvus mais faisant suite à l'emploi à long terme de la fraction liquide, de fortes doses d'application pourraient ainsi induire un déséquilibre cationique dans les fourrages étant donné la prévalence des monovalents sur les divalents dans le prélèvement des plantes. Un tel déséquilibre lié à l'excès de potassium peut affecter la disponibilité du calcium et du magnésium et provoquer la fièvre du lait ou une tétanie d'herbage. La valorisation de la fraction liquide sur les cultures destinées au bétail devra donc être bien supervisée. Dans les sols pauvres en calcium et magnésium, il serait donc recommandable de balancer les apports de calcium et magnésium avec des applications d'engrais minéraux.

Un second point d'importance à considérer réside dans le fait que l'azote de la fraction liquide pourrait présenter un coefficient d'efficacité (CE) plus élevé qu'attendu. Il existe en effet une relation très significative entre le rapport NH_4/N_{total} et le CE de l'azote pour les lisiers (Giroux et Lemieux, 2000). Puisque le $N-NH_4$ du lisier se retrouve en quasi totalité dans la fraction liquide et qu'une bonne partie de l'azote organique se retrouve dans la partie solide, le rapport NH_4/N_{total} de la fraction liquide devient plus élevé que celui du lisier. Le ratio NH_4/N_{total} qui se situe à 0,48 pour le lisier brut s'élève ainsi à 0,54 pour la fraction liquide. En conséquence, son CE serait d'autant supérieur à celui de l'azote du lisier brut. Un autre phénomène vient amplifier cette hausse du potentiel d'utilisation de l'azote. Le contenu en carbone organique est diminué d'un facteur de près de 2 dans la fraction liquide comparativement à 1,2 pour l'azote total. Le rapport C/N, auquel est liée la vitesse de décomposition des résidus organiques dans le sol, subi incidemment un changement identique. Plus ce rapport est faible, plus il laisse présager d'une forte minéralisation et d'une disponibilité élevée de l'azote suivant sa libération rapide par les

microorganismes du sol (CRAAQ, 2003). De plus, le carbone restant dans la fraction liquide est principalement sous une forme dissoute, très facilement utilisable par les microorganismes du sol. L'application de la fraction liquide au champ entraînera donc un relâchement de matières organiques dans la solution du sol qui entrera rapidement dans le cycle du carbone du sol. C'est pourquoi cette matière organique dissoute, bien qu'elle ne représente qu'une faible proportion du contenu en matières organiques total du sol, a quand même une influence importante sur le transport des nutriments, ainsi que sur l'activité des microorganismes du sol du sol.

Du côté du phosphore, la faible portion qui se retrouve dans la fraction liquide est probablement sous forme dissoute, principalement composée d'orthophosphates (95%) très labiles et d'un peu de phosphore organique (5%) (Giusquiani *et al.*, 1998, Gigliotti *et al.*, 2002). Le phosphore organique sera probablement sous forme de monester, principalement de l'acide phytique, très présent dans la diète des porcs qui ne peuvent pas l'assimiler. Ce type de phosphore organique est aussi particulièrement résistant à l'attaque par les microorganismes du sol et ne devrait donc pas contribuer à la nutrition des cultures. Il sera plutôt rapidement rétrogradé (fixé) dans le sol où il s'accumulera lentement. L'acide phytique est d'ailleurs reconnu comme étant un des composés phosphore organique les plus fixés par le sol où il forme souvent plus de 50% du phosphore organique total (Tisdale *et al.*, 1993).

7 Conclusion sur les résultats de l'évaluation du séparateur décanteur-centrifuge

Selon les conditions, le séparateur évalué peut traiter entre de 1,2 et 2,5 m³ heure⁻¹ de lisier brut. Ainsi, pour une même puissance d'opération, plus le lisier brut aura une siccité élevée, plus faible sera le débit à traiter. Par contre, la capacité de traitement du décanteur-centrifuge en terme de porcs-emplacementss traités, augmente avec la siccité du lisier brut. Ainsi, une gestion de l'eau efficace se traduira par le dimensionnement judicieux des équipements de traitement et un coût de procédé par porc produit substantiellement réduit.

L'analyse des cas présentés dans ce rapport indique que la siccité du lisier brut a une influence sur l'efficacité d'extraction du phosphore. Ainsi, pour du lisier de porcs à l'engraissement ayant une siccité supérieure à 3%, le séparateur décanteur-centrifuge permet une efficacité d'extraction du phosphore avoisinant 70%. Une efficacité d'extraction équivalente est également possible dans le cas du lisier de maternité qui possède un taux de matières sèches supérieur à 1,7%. Sous ces valeurs critiques, l'efficacité d'extraction décroît rapidement.

L'analyse sur l'extraction de la matière sèche n'a pas permis d'isoler un paramètre influençant son taux de capture. Les résultats obtenus ont démontré que pour le lisier de porcs à l'engraissement l'efficacité d'extraction de la matière sèche oscille autour de 45% avec un écart-type de 6,3% et ce, peu importe la siccité du lisier brut. De même, pour le lisier de porcs à la maternité, cette efficacité se situe en moyenne autour de 32% avec un écart type de 6,7%.

Les résultats obtenus lors des campagnes d'échantillonnages indiquent que le séparateur peut être ajusté aux particularités des lisiers issus de régimes alimentaires à base de moulée produite à la ferme ou à base de moulée cubée et ce, pour tous les types d'élevages porcins. Toutefois, le taux de matières sèches du lisier brut à traiter semble être le paramètre important qui permet d'assurer l'efficacité du procédé de centrifugation. Il est d'autant plus important d'optimiser la gestion de l'eau dans les opérations courantes dans une optique de diminution des volumes à traiter et de réduction de la siccité du lisier brut.

L'unité mobile et son séparateur décanteur-centrifuge ont suscités un vif intérêt de la part des éleveurs porcins et des intervenants du milieu lors des activités de démonstration. Les producteurs agricoles ont particulièrement apprécié la compacité du système, sa simplicité de fonctionnement et la siccité de la fraction solide produite. Plusieurs éleveurs ont également signalé la facilité avec laquelle ces équipements pourraient s'intégrer à leur régie d'élevage actuelle.

Le laboratoire mobile de séparation s'est avéré un outil de développement, d'information et de démonstration par excellence. Les résultats s'avèrent rassurants au point de vue technique puisqu'ils ont su répondre aux interrogations des entreprises qui devront faire face à des choix environnementaux.

8 Deuxième partie : Conditionnement et entreposage de la fraction solide

La fraction solide provenant d'un séparateur décanteur-centrifuge représente entre 7 et 10% de la masse initiale du lisier et contient la majorité du phosphore excrété par les porcs. En général, le matériel solide possède une siccité supérieure à 30 %. Les premières conditions sont ainsi réunies pour rendre possible l'exportation de ce matériel hors des zones en surplus. Néanmoins, toute action susceptible de bonifier le produit pour faciliter cette exportation est souhaitable. Le conditionnement de ce matériel pourrait lui conférer des caractéristiques susceptibles d'améliorer son acceptabilité auprès d'éventuels receveurs. Par conditionnement de la fraction solide, on entend la réduction des odeurs offensantes, la diminution des agents pathogènes tels que les coliformes fécaux et la diminution de sa masse afin d'en réduire les frais de transport.

Cette phase du projet visait à mettre à l'essai des techniques de conditionnement de la fraction solide et de suivre l'évolution des propriétés du matériel conditionné pendant une phase d'entreposage. Le conditionnement mise sur les propriétés intrinsèques de la fraction solide a chauffer rapidement en condition aérobie et fait appel à des techniques d'aération inspirées du compostage de résidus organiques. L'élévation de température observée dans la masse est donc le résultat d'un processus biologique naturel, conséquemment il n'est pas nécessaire d'apporter une source de chaleur extérieure pour augmenter la température des amas. Deux techniques de ventilation sont fréquemment relevées dans la littérature, soit la ventilation passive et la ventilation forcée (Rynk, 1992; Sartaj *et al.*, 1997). La ventilation passive fait appel à l'installation de tuyaux perforés à la base d'une pile de substrat et mise sur la convection naturelle pour acheminer l'air à travers les l'amas. Pour sa part, la ventilation forcée requiert l'emploi d'un ventilateur mécanique et d'un circuit de conduites perforées à la base des amas. Selon des essais réalisés par l'IRDA durant l'été 2004 (Trudelle *et al.*, 2005), le recours à la ventilation forcée pour le conditionnement de la fraction solide est nettement préférable à celui de la ventilation passive puisque cette première favorise le passage de l'air au travers de l'amas et permet de créer les conditions aérobies propices aux bactéries thermophiles responsables de l'assainissement de l'amas et de la dégradation de la matière. Aussi, tous les essais de conditionnement de cette partie du projet ont été effectués en utilisant une ventilation forcée. Néanmoins, la ventilation passive a été essayée pour certains traitements pendant la phase d'entreposage.

Les objectifs spécifiques de cette phase du projet consistent à mesurer les impacts du conditionnement et de l'entreposage sur différentes caractéristiques de la fraction solide qui pourraient être modifiées et avoir un impact sur une éventuelle exportation du produit hors des zones en surplus, soit :

- **La teneur en eau :** Une réduction de la masse permet de réduire les coûts associés au transport du matériel hors des zones en surplus;
- **La contenu en agents pathogènes :** La destruction des agents pathogènes permet une utilisation plus sécuritaire du matériel et diminue la méfiance quant à son impact sur la santé humaine après épandage. La fraction solide sera caractérisée pour son contenu en coliformes fécaux (confirmés à *E. coli*) tout au long du conditionnement;
- **Le dégagement d'odeur :** Une réduction des odeurs dégagées par une fraction solide traitée devrait augmenter son acceptabilité sociale comme engrais de ferme surtout dans

des zones périurbaines sensibles aux odeurs dégagées pendant et après les opérations d'épandages;

- **La composition physico-chimique :** Le conditionnement et la maturation devraient permettre de concentrer les éléments nutritifs tout en réduisant jusqu'à un certain point, la teneur en carbone et en azote de la fraction solide.

9 Matériel et méthodes des essais de conditionnement de la fraction solide

9.1 Cellules de conditionnement

Pour effectuer l'expérimentation à une échelle réaliste, six cellules de conditionnement de 1,2 x 1,2 x 1,8 m de haut, dont les murs ont été érigés avec des blocs pré-fabriqués de béton ont été construites à l'intérieur d'une serre de la ferme expérimentale de l'IRDA à Saint-Lambert-de-Lauzon. Les joints entre les blocs ont été scellés avec de l'uréthane. L'ouverture permettant de charger une cellule est refermée par des planches en bois de 50 x 150 mm. Les planches sont recouvertes d'une membrane de polyéthylène afin de minimiser les fuites d'air (Figure 32). Une cellule permet de traiter un volume de 2,6 m³ de fraction solide. Chaque traitement a été réalisé simultanément dans trois cellules de conditionnement afin d'en vérifier la répétitivité d'une cellule à l'autre. Deux traitements pouvaient être réalisés simultanément.



Figure 32: Montage des cellules de conditionnement

Les cellules ont été aérées par ventilation forcée positive en utilisant un ventilateur modifié (Dayton, modèle 2C820) d'une capacité de 275 L s⁻¹ à 0 mm d'eau de pression statique et d'une capacité maximale de 280 mm d'eau de pression statique avec aucun débit d'air. Selon le traitement, l'injection d'air s'est faite de manière intermittente ou en continu. Pour les scénarios intermittents, le ventilateur était relié à une minuterie qui déclenchait le début et la fin du cycle d'aération. Pour déterminer les fréquences de poussée et de repos, une approche empirique tenant compte du contenu en oxygène et de la température dans les piles a été utilisée. La concentration en oxygène a été maintenue à un minimum de 5% afin de conserver des conditions aérobies (Rynk, 1992). Afin de suivre l'évolution de la concentration en oxygène, des tubes reliés à une

pompe à vide et à un analyseur d'oxygène (Metek, LC CEM O₂, précision $\pm 0,05$ %) ont été enfouis en trois points (haut, milieu et bas d'une pile) de chacune des cellules. Des lectures ont été effectuées régulièrement durant chaque traitement pour assurer le maintien de la consigne minimale de 5 %.

La mesure de la température est le baromètre principal de l'évolution du conditionnement. Une augmentation de la température indique une activité microbienne importante. Une phase thermophile aura lieu si le matériel atteint des températures de 45 à 75°C (BNQ, 1997). Cette phase thermophile permet d'augmenter la vitesse de décomposition de la matière organique en humus et en minéraux. Selon l'agence américaine de protection en environnement (EPA, 1979), si la température est maintenue au-dessus de 55°C durant au moins trois jours, les agents pathogènes présents dans la fraction solide seront détruits. Par les mots agents pathogènes, on entend les organismes potentiellement nuisibles pour la santé de l'homme et qui peuvent causer des maladies. En plus de leur effet sur les agents pathogènes, ces températures élevées sont réputées pour tuer la majorité des champignons, des nématodes et la plupart des graines de mauvaises herbes, sans toutefois tuer les virus qui subissent tout de même une perte de vigueur. L'activité bactérienne va également provoquer une réduction du volume et de la masse de la fraction solide par perte d'eau et de gaz carbonique. Chaque cellule a été instrumentée pour vérifier l'évolution de la température et de la concentration en oxygène. Trois thermocouples constantan-cuivre d'une précision de $\pm 1^\circ\text{C}$ reliés à un système d'acquisition de données (Campbell Scientific, 21X) mesurait l'évolution de la température selon un axe vertical dans le premier (haut), deuxième (milieu) et troisième tiers (bas) de chaque cellule.

Pour les scénarios avec injection d'air continue, un débit d'air produisant une vitesse apparente de $0,0002 \text{ m s}^{-1}$ à l'intérieur des cellules a été utilisé en première approximation (Barrington *et al.*, 2002), la vitesse apparente étant le rapport entre le débit d'air utilisé et la section d'une cellule ($1,44 \text{ m}^2$). Dans ces cas, la température et la concentration en oxygène ont également été mesurées pour vérifier le comportement des cellules.

Le circuit de ventilation installé à la base de chacune des cellules était constitué de conduites de PVC de 50 mm de diamètre disposées en forme de U, chacune des branches ayant 840 mm de long et espacée de 380 mm. Chaque branche possédait deux rangées de 13 trous de 9,5 mm de diamètre et chaque trou était espacé de 50 mm. Chaque rangée de trous était orientée à 45 degrés vers le bas par rapport à l'axe transversal des tuyaux (Rynk, 1992). Les tuyaux ont été recouverts d'un plénum composé de copeaux de bois ayant pour but de répartir uniformément l'air sous la pile, tout en prévenant le colmatage des trous (Figure 33). L'aménagement des tuyaux prévoyait un espace entre le plénum et les parois de la cellule afin de ne pas favoriser les chemins préférentiels de l'air.



Figure 33: Montage du plénum de ventilation

La ventilation de chacune des cellules a été régularisée en utilisant une valve à guillotine dans la conduite principale située en amont de l'embranchement en U du circuit de ventilation de chaque cellule. Les débits de ventilation et la pression statique ont été mesurés à l'intérieur de cette conduite principale, en positionnant en aval de la valve de contrôle un anémomètre à fil chaud (Pacer, DA4000, précision $\pm 1\%$) et un manomètre électronique (Alnor, AXD550, précision $\pm 1\%$). L'équation 5 permet de calculer le débit d'écoulement appliqué sur chaque cellule.

$$Q_c = V_m A \quad (5)$$

Où :

- Qc : Débit d'air dans la conduite ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$);
- Vm : Vitesse moyenne de l'air mesurée dans la conduite (m s^{-1});
- A : Section d'écoulement de la conduite (m^2)

9.2 Cellules de maturation

Suite au conditionnement, une période d'entreposage de 80 à 90 jours assurait la maturation d'un amas. Neuf cellules de maturation ont été construites de la même manière et aux mêmes dimensions que les cellules de conditionnement. Cette façon d'entreposer la fraction solide reconstituait les conditions qui prévalaient au centre d'un amas. Ces conditions sont jugées être les pires situations retrouvées dans une pile puisqu'elles favorisent des conditions anaérobies génératrices de mauvaises odeurs.

Pour deux traitements, les cellules de maturation ont été divisées en deux parties égales par l'usage d'une cloison centrale verticale de manière à vérifier si une aération passive influencerait la maturation d'un amas. Ainsi, d'un côté de la cloison, l'amas a été déposé directement sur le sol alors que de l'autre côté, l'amas reposait sur une conduite de plastique de 100 mm de diamètre perforée de deux rangées de 15 trous de 13 mm de diamètre répartis à tous les 115 mm le long de la conduite. Les deux rangées de trous étaient orientées à 45 degrés vers le haut par rapport à l'axe transversal du tuyau (Rynk, 1992).

9.3 Prise d'échantillons

Pendant la période d'observation d'un traitement, de la sortie du séparateur décanteur-centrifuge jusqu'à la fin de la période d'entreposage, des échantillons de fraction solide ont été prélevés pour mesurer l'évolution dans le temps des caractéristiques physico-chimiques, microbiologiques et du niveau d'odeur. Au niveau des cellules de conditionnement et de maturation, les échantillons ont été recueillis en prélevant des échantillons composites constitués de chacune des trois strates d'un amas (haut, milieu et bas). La valeur moyenne de ces trois points de mesure a été utilisée pour caractériser les modifications du substrat d'une cellule à travers le temps.

9.4 Analyses physico-chimiques et microbiologiques

Toutes les analyses physico-chimiques et microbiologiques ont été réalisées dans les laboratoires de l'IRDA. Les échantillons prélevés pour les analyses microbiologiques ont été caractérisés pour leur contenu en coliformes fécaux (confirmés à *E. coli*). La présence de coliformes fécaux a été déterminée selon la méthode d'analyse MFLP-55 de la Direction générale de la protection de la santé de Santé Canada (BNQ, 1997). Les résultats sont exprimés sous forme de nombre le plus probable (NPP). Le NPP est une estimation statistique du nombre de bactéries. En fin de traitement, la teneur en coliformes fécaux ne devrait pas dépasser 1000 NPP (BNQ, 1997).

9.5 Mesure d'odeur

Lors des périodes d'échantillonnages, un échantillon de fraction solide a été prélevé et congelé pour en mesurer ultérieurement son niveau d'odeur. Une fois l'échantillon décongelé, le seuil de détection d'odeur a été déterminé par des essais d'olfactométrie effectués à partir de la méthode par choix forcés normalisée par l'American Society for Testing and Materials (ASTM, 1997). Cette méthode consiste à diluer plusieurs fois l'échantillon dans un substrat choisi par l'expérimentateur. Dans le cas de la fraction solide, le gruau d'avoine s'est avéré le substrat le plus adapté en raison de sa masse volumique avoisinant celle de la fraction solide, ce qui facilite l'homogénéisation des deux composantes.

Lors du test, (Figure 34), les panélistes devaient obligatoirement désigner parmi les trois pots



présentés celui qui dégageait une odeur différente. Un seul des pots contenait un mélange de fraction solide et de gruau, les deux autres pots ne contenaient que du gruau. Six tests de différentes concentrations permettaient de déterminer le seuil de détection. Les concentrations doublient d'un test à l'autre et ont varié d'une concentration 1/50 à 1/6400. Un essai complet pour un panéliste comportait 18 échantillons à sentir impliquant ainsi six niveaux de dilution.

Figure 34: Essai olfactométrique

Au moins 10 personnes devaient participer aux tests et le choix des panélistes s'est fait sur une base aléatoire et volontaire (cinq hommes et cinq femmes) parmi le personnel de l'IRDA (clérical et technique). L'analyse des résultats obtenus par les panélistes a permis de calculer le seuil de détection du panéliste et l'intégration des résultats individuels a permis d'estimer le seuil de détection du groupe.

9.6 Description des traitements

Le Tableau 9 résume les traitements utilisés pendant les essais. La période d'observation des traitements a été de 90 jours et comprenait une phase de conditionnement et une phase de maturation. Au total, cinq traitements ont été appliqués. Pour le conditionnement, on distinguait quatre approches :

- Aucune ventilation;
- Une ventilation forcée intermittente pendant 10 jours;
- Une ventilation intermittente durant quatre jours suivie de 24 heures à fort débit soutenue permettant d'évacuer la vapeur d'eau produite pendant les journées précédentes suivi d'une reprise de la ventilation intermittente durant quatre jours et de 24 heures à fort débit de ventilation;
- Une ventilation légère mais continue pendant neuf jours suivie d'une période de 24 heures avec une ventilation soutenue et puissante permettant d'évacuer la vapeur d'eau produite pendant les journées précédentes.

Pour la maturation, trois scénarios ont été évalués, soit :

- Une période de maturation variant de 80 à 90 jours selon le conditionnement effectué et ne faisant appel à aucune ventilation ou à une ventilation passive;
- Une période de maturation de 80 jours sans aucune ventilation;
- Une période de maturation de 80 jours avec une ventilation intermittente.

Tableau 9: Traitements appliqués à la fraction solide

Nom du traitement	Conditionnement	Maturation
C0-M0	Aucun	90 jours sans ventilation et avec ventilation passive
C10-M0	Ventilation intermittente durant 10 jours	80 jours sans ventilation et avec ventilation passive
C10-M80	Ventilation intermittente durant 10 jours	Ventilation intermittente durant 80 jours
C8-M0	Ventilation intermittente durant quatre jours suivie de 24 heures à fort débit de ventilation et reprise de la ventilation intermittente durant quatre jours suivie de 24 heures à fort débit de ventilation	80 jours sans ventilation
C9c-M0	Ventilation continue durant neuf jours suivi de 24 heures à fort débit de ventilation	80 jours sans ventilation

Cx-My :

x= nombre de jours de ventilation à faible débit lors du conditionnement;

y= nombre de jours avec ventilation forcée pendant la maturation.

La fraction solide évaluée provenait de la séparation d'un lisier brut produit par des porcs à l'engraissement alimentés avec une moulée préparée à la ferme.

10 Résultats des essais sur la fraction solide

10.1 Caractérisation de la fraction solide issue du séparateur

Le Tableau 10 résume les propriétés physico-chimiques des fractions solides à la sortie du séparateur. Les valeurs présentées pour chacun des traitements proviennent d'échantillons composites recueillis avant le début du cycle d'aération. Le coefficient de variation (CV) (équation 6) entre les différentes fractions solides traitées est respectivement de 6 et de 16% pour la teneur en matières sèches et le rapport C/N. Ces indices sont assez révélateurs du caractère homogène des différents substrats en ce qui concerne leurs propriétés fondamentales pour le compostage.

$$CV = \frac{S}{\bar{X}} \times 100 \quad (6)$$

Où :

- CV : Coefficient de variation
- S : Écart type entre les valeurs de chacun des traitements;
- \bar{X} : Moyenne arithmétique entre les valeurs de chacun des traitements.

10.2 Conditionnement

Les conditionnements des traitements C8-M0, C10-M0 et C10-M80 ont fait appel à une ventilation intermittente pendant le temps de séjour de la fraction solide dans les cellules. La ventilation nécessaire au maintien des conditions aérobies (soit une concentration $\geq 5\%$ O₂ dans toutes les strates d'une pile) peut être caractérisée par l'utilisation d'un débit de 17 L s⁻¹ pulsé à raison de 15 secondes toutes les 10 minutes à une pression statique de 250 mm d'eau.

Ramené sur une base continue, un débit d'air de 0,425 L s⁻¹ a été appliqué créant une vitesse apparente (V_a) de 0,0003 m s⁻¹ à l'intérieur de chaque cellule. La vitesse apparente dans une cellule est donnée par l'équation 7.

$$V_a = \frac{Q_c C}{60 A_p} \quad (7)$$

Où :

- V_a : Vitesse apparente de l'air dans une cellule (m s⁻¹);
- C : Cycle de pulsation du ventilateur (s min⁻¹);
- A_p : Section d'une cellule (1,44 m²).

Le conditionnement C9c-M0 a été effectué en utilisant un débit continu de 0,33 L s⁻¹ créant une vitesse apparente de 0,0002 m s⁻¹ à l'intérieur de chaque cellule. Bien que très faible, on estime qu'une pression statique inférieure à 10 mm d'eau a été requise pour maintenir ces conditions de ventilation.

La Figure 36 illustre la variation de la température moyenne dans les 3 cellules de conditionnement pour les traitements C0-M0, C10-M0 et C10-M80. Le traitement C0-M0 est le traitement témoin pour lequel aucun apport d'air n'a été effectué. On note peu de variation de



température dans ces piles au cours de la période de conditionnement, soit les 10 premiers jours d'existence des piles. Pour leur part, les traitements C10-M0 et C10-M80, soit une ventilation intermittente durant 10 jours, présentent une hausse remarquable de la température en moins de trois jours. On observe une pointe de plus de 70 °C suivie d'un abaissement progressif vers 60 °C les sept jours suivants. Le maintien d'une température de plus de 55 °C pendant au moins trois jours pour rencontrer la norme d'assainissement de l'EPA a été réalisé dans ces deux essais. La Figure 37 présente l'évolution de la température dans les cellules de conditionnement ayant reçu les traitements C8-M0 et C9c-M0. Rappelons que ces traitements, en plus d'utiliser de petits débits d'air pour favoriser l'activité microbienne, font appel à l'utilisation de cycles de forte aération afin de permettre l'évacuation de la vapeur d'eau créée par l'élévation de température dans la masse.

Figure 35: Amas en fin de conditionnement (C9c-M0)

Le traitement C8-M0 prévoit l'utilisation d'un débit intermittent pour l'activité microbienne et deux cycles de forte aération, soit l'un à mi-parcours de conditionnement et un second à la fin du traitement. Dans ce scénario, il était prévu qu'à la fin du premier cycle de forte aération, une seconde hausse de la température surviendrait.

L'examen de la Figure 37(a) révèle que bien que la température de 70°C ait été atteinte et qu'un premier cycle de refroidissement ait été réalisé avec succès, la seconde élévation de température attendue ne s'est pas produite. Néanmoins, conformément au scénario prévu, un deuxième cycle de forte aération a été réalisé à la fin de ce traitement. Pour sa part, le traitement C9c-M0 (Figure 37(b)) prévoit l'utilisation d'un débit d'air continu pour le maintien de l'activité microbienne et une période de forte aération à la fin du traitement. En début de traitement, l'évolution de la température suit un cheminement comparable à celui suivi par les traitements ayant fait appel à la ventilation intermittente, soit l'atteinte d'une température près de 70 °C après trois jours d'aération. On note une légère décroissance de la température les jours subséquents, quoique moins prononcée que pour les traitements C10-M0 et C10-M80, probablement attribuable à une température extérieure plus élevée au moment du traitement C9c-M0. L'abatée de la température témoigne du cycle de refroidissement appliqué en fin de traitement. Le Tableau 11 résume les caractéristiques physico-chimiques moyennes de la fraction solide une fois conditionnée par les différents traitements. Les résultats présentés sont l'intégration en une valeur moyenne des données obtenues des trois strates (haut, milieu, bas) des trois piles (soit neuf points au total) recevant un traitement particulier.

Tableau 10: Propriétés physico-chimiques des fractions solides à la sortie du séparateur

Élément	Traitement	C0-M0	C10-M0	C10-M80	C8-M0	C9c-M0	Moyenne	Écart-type	Coef.de variation %
M.S.	%	39,60	40,76	38,43	40,12	44,52	40,69	2,31	5,67
teneur en eau	%	60,40	59,24	61,58	59,88	55,48	59,31	2,31	3,89
M.O.	%	84,58	85,72	85,87	77,64	78,37	82,44	4,08	4,96
pH		8,47	8,42	8,25	8,88	7,82	8,37	0,38	4,59
C/N		15,10	16,07	16,00	10,46	14,63	14,45	2,31	16,00
C	mg/kg (B.H.)	167475,57	174699,70	164985,16	155758,78	174438,56	167471,55	7812,75	4,67
N-TOTAL		11144,74	10911,72	10313,31	15920,62	12229,93	12104,06	2243,36	18,53
N-NH ₄		3831,92	3701,36	3287,04	2295,29	3374,28	3297,98	603,98	18,31
N-NO ₃		2,91	5,32	5,84	1,25	1,22	3,31	2,19	66,34
P-HCL		7999,64	1531,36	6845,89	8943,67	8884,58	6841,03	3087,56	45,13
P soluble H ₂ O		368,32	351,45	383,61	427,02	475,16	401,11	50,01	12,47
P		6688,91	5606,69	6115,25	9855,56	9987,61	7650,81	2108,50	27,56
K		2532,89	2244,29	2219,53	2693,39	2770,84	2492,19	252,77	10,14
Ca		5508,17	5838,37	5149,56	12758,37	15710,23	8992,94	4903,24	54,52
Mg		4382,71	3860,41	3985,50	7143,12	6747,66	5223,88	1589,46	30,43
Al		138,48	137,65	113,38	160,29	183,53	146,67	26,46	18,04
B		12,66	10,62	10,96	10,53	10,88	11,13	0,87	7,85
Cu		45,86	42,60	46,02	52,48	54,70	48,33	5,05	10,45
Fe		428,33	444,98	473,88	600,32	712,94	532,09	121,56	22,85
Mn		117,10	105,63	109,45	189,60	196,54	143,67	45,35	31,57
Zn	143,00	126,32	127,33	204,42	189,39	158,09	36,43	23,05	
Na	684,07	624,40	623,43	835,43	821,52	717,77	104,12	14,51	

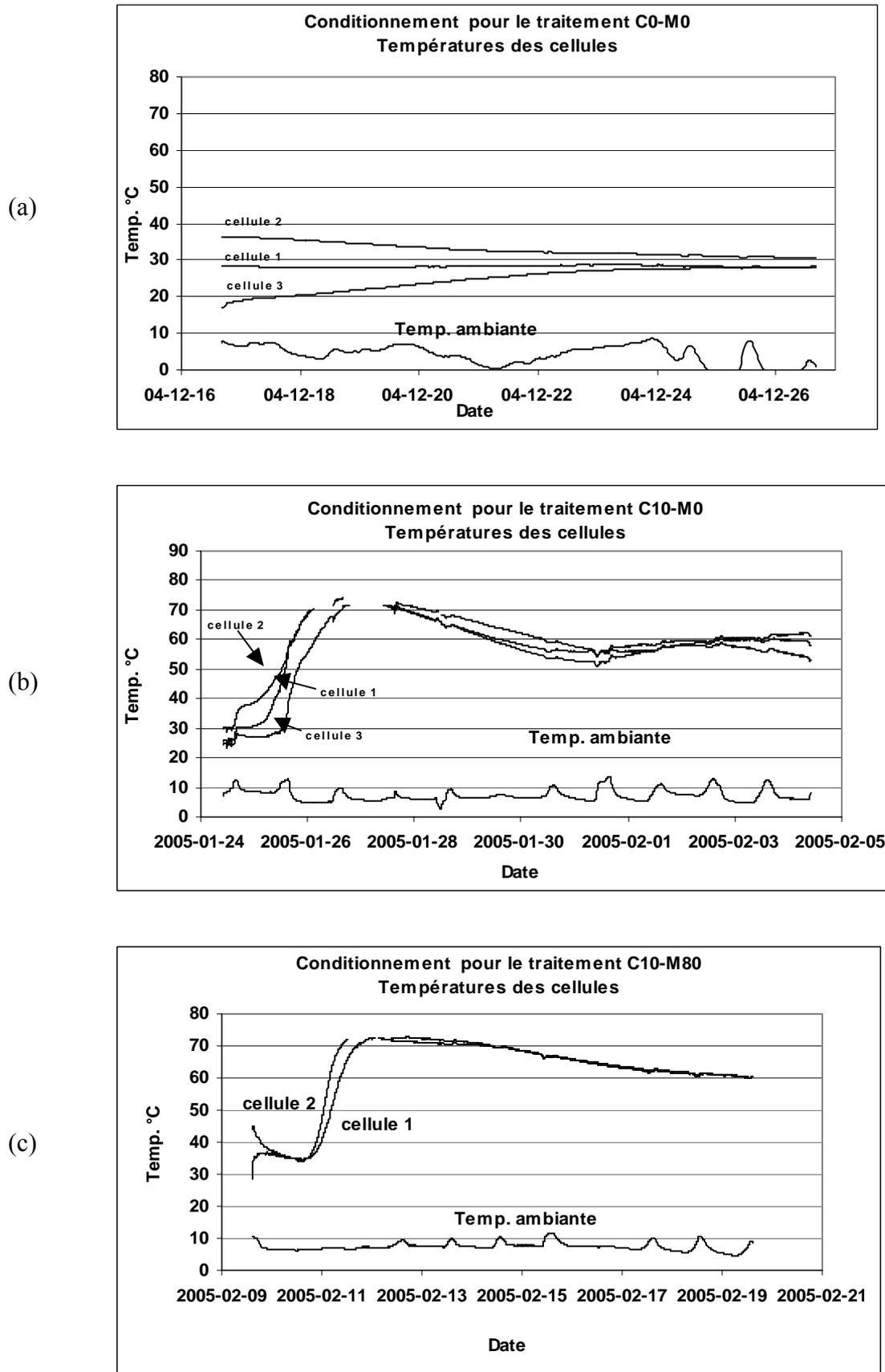


Figure 36: Températures moyennes dans les cellules pour les conditionnements C0-M0 (a), C10-M10 (b) et C10-M80 (c)

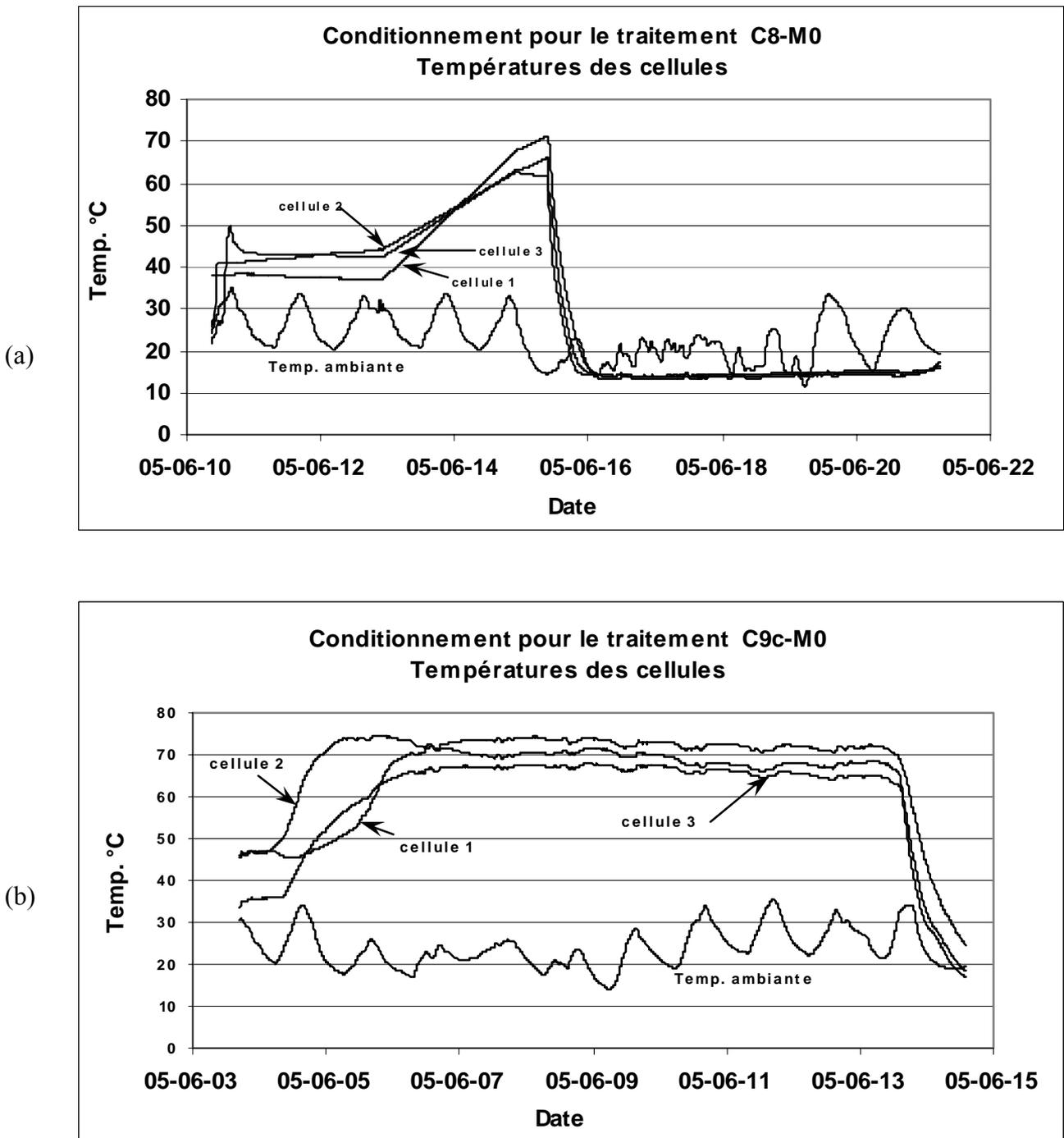


Figure 37: Températures moyennes dans les cellules pour les conditionnements C8-M0 (a) et C9c-M0 (b)

Tableau 11: Caractéristiques des fractions solides après la période de conditionnement selon les traitements

Élément	Traitement	C0-M0	C10-M0	C10-M80	C8-M0	C9c-M0
M.S.	%	38,26	41,51	39,43	41,42	51,64
teneur en eau	%	61,74	58,49	60,57	58,58	48,36
M.O.	%	84,72	84,72	84,64	77,55	75,74
pH		8,45	8,45	7,29	7,81	7,53
C/N		13,89	16,03	13,54	12,38	13,39
C	mg/kg (B.H.)	162053,80	176602,59	166878,92	160608,18	195571,33
N-TOTAL		11668,42	11023,91	12320,65	13017,66	14813,16
N-NH ₄		3831,09	3112,01	3746,28	4103,33	3997,18
N-NO ₃		2,66	3,54	5,71	1,37	3,73
P-HCL		7140,97	7607,85	8311,11	10381,47	11930,87
P soluble H ₂ O		371,77	618,82	424,94	370,48	488,33
P		6074,14	6239,49	6780,46	10689,22	13168,30
K		2398,50	2523,71	2463,36	3102,71	3845,49
Ca		5085,03	6293,58	5989,00	13398,44	18192,05
Mg		3944,26	4053,22	4453,52	7822,78	9755,86
Al		134,51	143,10	173,48	482,11	629,96
B		12,06	12,15	11,87	23,91	25,82
Cu		41,91	48,54	52,97	59,27	75,65
Fe		399,64	461,13	499,49	734,50	1038,14
Mn		106,96	110,12	124,24	226,63	293,79
Zn		135,76	138,67	144,10	227,52	301,33
Na	650,89	696,12	694,71	960,04	773,72	

10.3 Maturation

À la suite du conditionnement, les fractions solides traitées ont été transférées dans des cellules de maturation pour une période de 80 jours. Le Tableau 12 présente les valeurs moyennes des propriétés physico-chimique des fractions solides à l'issue de cette période d'entreposage. On remarquera pour les traitements C0-M0 et C10-M0 des résultats comparant l'entreposage en utilisant une ventilation passive et aucune ventilation.

Au cours de la période de conditionnement et de maturation, les pertes en éléments volatils ont été évaluées. L'estimation de ces pertes nécessite l'utilisation de traceurs contenus dans la fraction solide qui ne pourront pas disparaître ou se transformer en cours de traitements, à moins qu'il n'y ait de la lixiviation. À ce titre, les métaux lourds agissent comme d'excellents traceurs. Une augmentation de la concentration de ces éléments dans le temps indique une diminution de la teneur en eau et en matières sèches de la fraction solide en cours de traitement. Le tableau 5 illustre, à titre d'exemple, l'utilisation du cuivre, du fer et du zinc comme indicateurs et compare les concentrations de ces éléments pour le traitement C9c-M0 entre le jour 0 (Tableau 10) et le jour 90 (Tableau 12). De manière générale, l'utilisation de ces indicateurs permet de constater que la fraction solide s'est concentrée d'environ 2,16 fois entre le début et la fin du traitement signifiant ainsi que d'une masse initiale de 1000 grammes de fraction solide, il ne resterait à la fin du traitement que 463 grammes soit une perte globale en masse de 53,7 %. On peut donc, grâce à ces indicateurs, évaluer les pertes de masse totales, de matières sèches, d'eau, de carbone et d'azote en relevant à travers le temps les teneurs en matières sèches et les concentrations relatives de ces éléments dans la fraction solide.

L'équation 8 permet d'obtenir la perte d'un élément donné dans le temps.

$$P_e = \left[\frac{C_0 - \frac{C_t}{VC_t}}{C_0} \right] \times 100 \quad (8)$$

Où

- Pe : Perte dans le temps de l'élément évalué (%) ;
- C0 : Concentration de l'élément au jour 0 (mg kg^{-1}) ;
- Ct : Concentration de l'élément à un temps t (mg kg^{-1}) ;
- VCt : Variation de la concentration à un temps t selon les indicateurs.

A titre d'exemple, on peut estimer que la perte en azote total du début à la fin du traitement C9c-M0 est d'environ 19 % en utilisant respectivement comme valeur pour C₀, C_t et VC_t 12229,93 mg kg^{-1} (Tableau 10), 21430,46 mg kg^{-1} (Tableau 12) et 2,16.

Tableau 12: Caractéristiques des fractions solides à la fin de la période de maturation selon les traitements

Élément	Traitement	C0-M0	C0-M0 passif	C10-M0	C10-M0 passif	C10-M80	C8-M0	C9c-M0
M.S.	%	37,04	36,42	53,99	56,20	44,73	67,34	69,95
teneur en eau	%	62,96	63,58	46,01	43,80	55,27	32,66	30,05
M.O.	%	75,42	76,00	76,62	77,29	75,89	69,97	69,94
pH		6,87	7,07	6,55	6,63	6,18	7,70	7,64
C/N		8,44	8,76	9,61	5,61	8,56	10,92	11,41
C	mg/kg (B.H.)	139815,59	138408,62	206824,15	217178,64	169737,12	235589,49	244621,56
N-TOTAL		16559,33	16041,40	21523,78	38732,32	19818,49	21566,92	21430,46
N-NH ₄		3610,74	3507,91	2115,73	4038,81	2851,75	2770,55	2911,23
N-NO ₃		9,74	8,79	202,38	308,33	332,15	22,75	41,66
P-HCL		13166,09	12827,55	15358,60	27550,98	11893,02	19436,87	17839,43
P soluble H ₂ O		829,90	814,95	1661,89	2865,10	1274,83	444,71	535,10
P		12695,28	11835,82	16207,38	28845,69	14211,87	22018,17	19975,73
K		3414,52	3297,59	5596,35	10034,39	4539,95	5924,47	5843,60
Ca		8439,55	8054,52	17965,39	31575,77	13373,86	29301,56	27931,63
Mg		8977,05	8346,47	11677,30	20760,96	10353,82	16183,21	14974,01
Al		196,40	186,92	298,26	534,99	274,80	929,66	1060,87
B		16,13	15,53	26,74	47,63	22,69	36,94	31,27
Cu		79,28	74,51	109,61	194,62	105,05	117,35	116,37
Fe		877,57	826,82	1102,41	1970,67	1076,14	1489,05	1566,89
Mn		226,39	212,44	318,82	563,30	299,55	462,69	437,27
Zn		226,59	214,63	343,00	609,53	307,49	449,67	414,27
Na	1110,76	1079,37	3042,48	2963,26	1281,23	1839,49	1689,95	

Tableau 13: Variation de la concentration de Cuivre, Fer et Zinc entre le début et la fin du traitement C9c-M0

Traitement C9c-M0			
	Jour 0	Jour 90	Variation de la concentration
Éléments	mg/kg	mg/kg	
Cu	54,7	116,37	2,12
Fe	712,94	1566,89	2,19
Zn	189,39	414,27	2,18
			Moyenne: 2,16

Le Tableau 14 présente les pertes en éléments volatils à la fin de la période de maturation pour les différents traitements. Il est à remarquer que les traitements ayant fait l'objet d'une ventilation passive pendant la maturation ont essentiellement les mêmes pertes que les traitements comparables sans ventilation passive. En conséquence, il apparaît que la ventilation passive ne permet pas de concentrer d'avantage les éléments fertilisants. Ce constat quant à la très faible incidence d'un système de ventilation passive sur les résultats finaux a conduit à délaissé ce dernier pour les traitements C8-M0 et C9c-M0 qui ont été réalisés à la suite des traitements C0-M0, C10-M0 et C10-M80.

Les graphiques de la Figure 38 et 39 présentent l'évolution observée en perte de matières volatiles au cours de la période de 90 jours pour tous les traitements.

Tableau 14: Estimation des pertes en éléments volatils à la fin de la période de maturation selon les traitements

Traitement	C0-M0	C0-M0 passif	C10-M0	C10-M0 passif	C10-M80	C8-M0	C9c-M0
Élément	Perte (%)						
Masse totale	44,05	40,66	63,43	61,38	56,95	56,63	53,94
Matière sèche	47,67	45,42	49,08	46,75	49,88	27,21	27,61
eau	41,68	37,54	73,31	71,45	61,36	76,34	75,05
Carbone	53,29	50,96	54,62	51,99	55,71	34,39	35,40
Azote totale	16,87	14,59	23,04	22,96	17,27	41,24	19,28

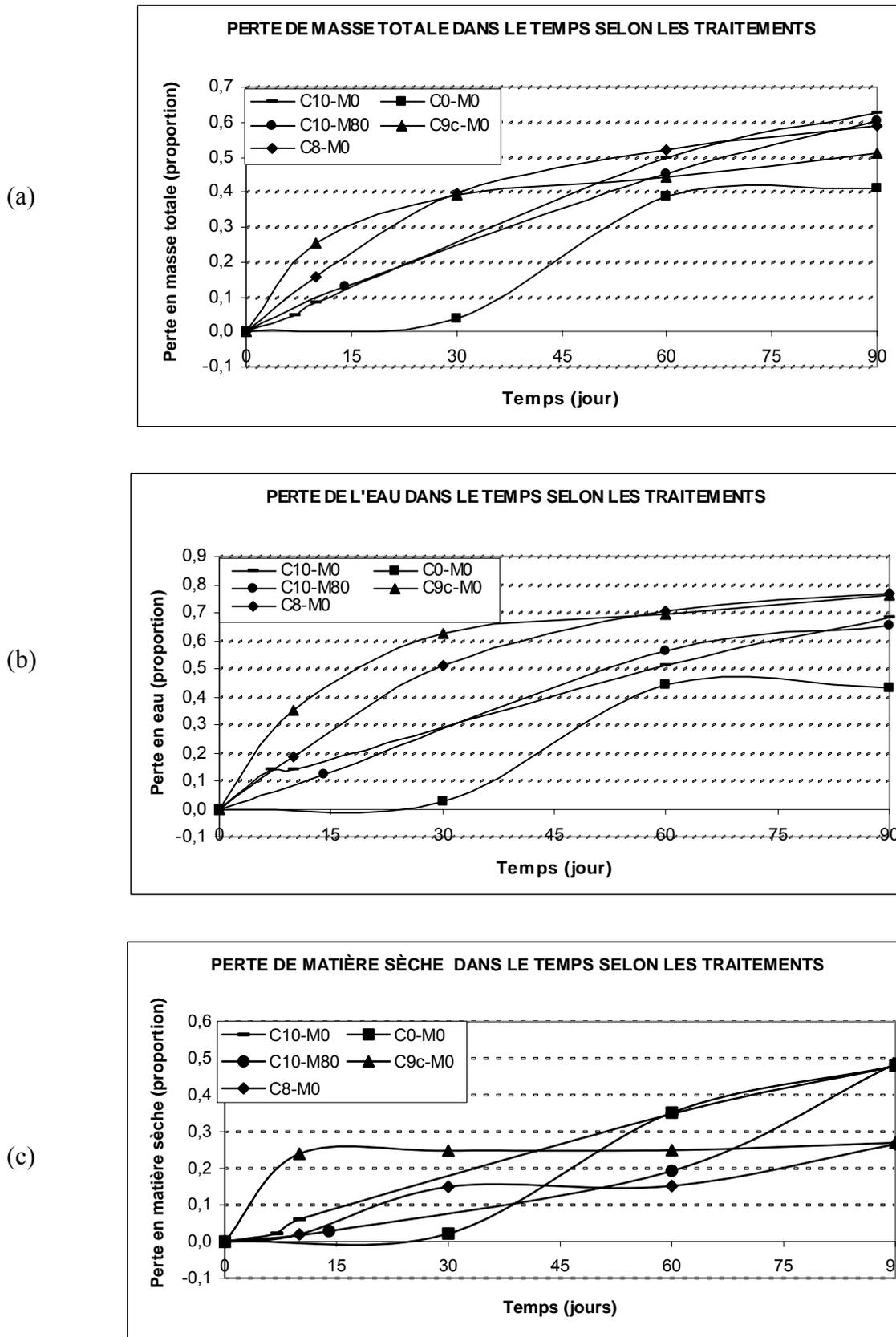


Figure 38: Pertes en masse totale (a), en eau (b) et en matières sèches (c) au cours des traitements

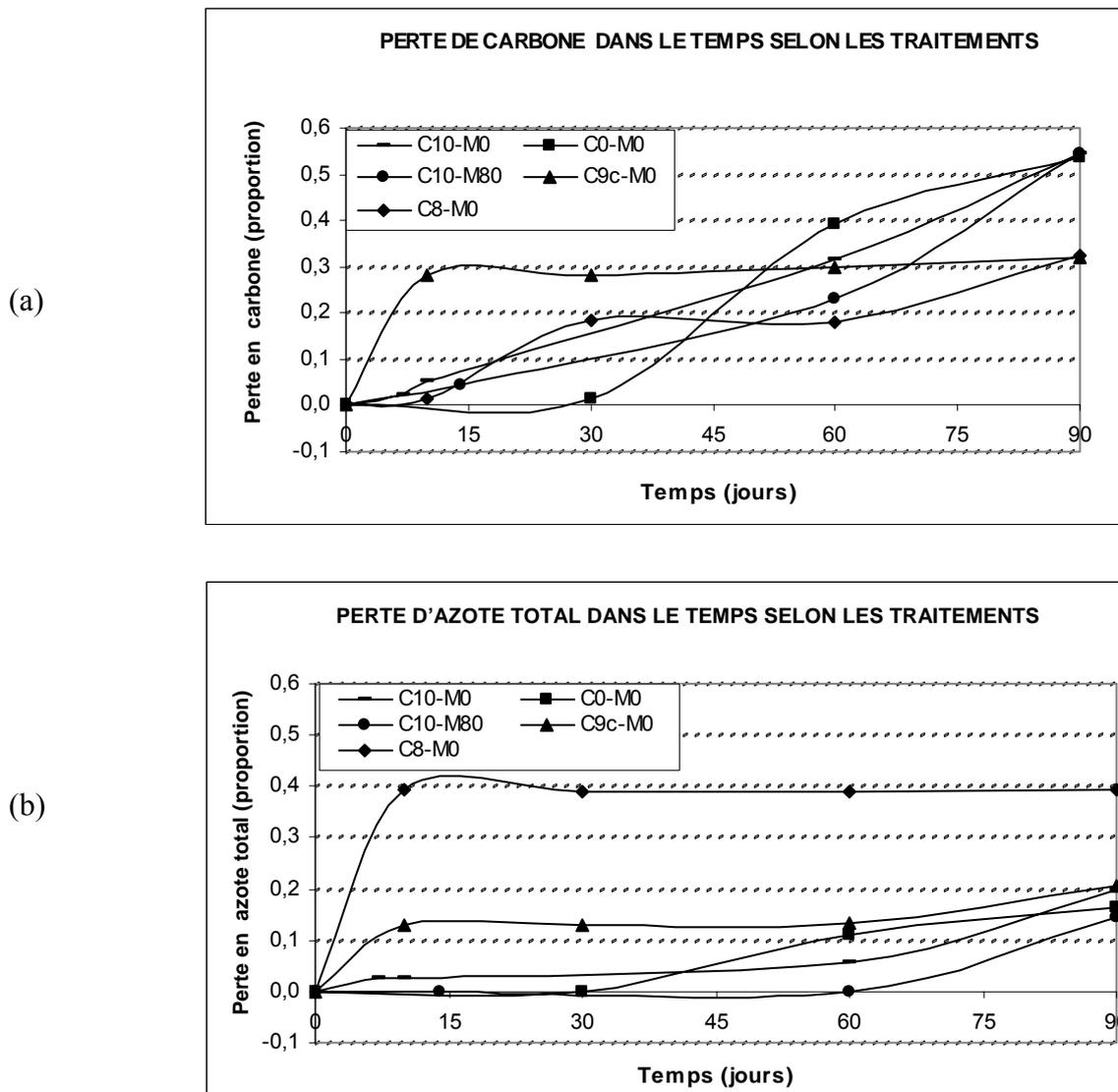


Figure 39: Pertes en carbone (a) et en azote total (b) au cours des traitements

10.4 Évolution des odeurs

Le seuil de détection d'odeur dégagée par les fractions solides en cours de traitement a été évalué par la méthode E-691-91 de l'ASTM (1997). Le Tableau 15 présente les résultats d'un essai effectué pour le traitement C10-M0 au jour 0. Dans cet essai, six niveaux de dilution variant de 200 à 6400 ont été utilisés, ceux-ci progressant selon un facteur constant de deux. La méthode prévoit que la note associée à un panéliste, donc son seuil de détection, est la moyenne géométrique entre la valeur de dilution où s'est produite le dernier échec (0) et la valeur de dilution suivante désignée par un (+). La moyenne géométrique est dans ce cas la racine carrée du produit de ces deux valeurs. À titre d'exemple, le seuil de détection du panéliste no. 1 est la racine carrée du produit entre 6 400 et 3 200 soit 4 525. Pour le cas des panélistes no. 3, 4, 6 et 9, il faut supposer qu'ils auraient échoué à la dilution suivant celle de 6 400, ce qui permet d'établir leur seuil à 9050 (soit la racine carrée du produit de 12 800 et 6 400). Le seuil de détection du groupe est la moyenne géométrique des seuils de détection des différents panélistes. Dans le cas de cet essai, il s'agit de la racine dixième du produit des différents résultats individuels. On peut également calculer le seuil de détection du groupe selon la méthode exposée au Tableau 15. La valeur du seuil de détection du groupe a été retenue pour caractériser l'évolution des odeurs dans le temps pour un traitement donné.

Tableau 15: Évaluation du seuil de détection d'odeur pour le traitement C10-M0 au jour 0

panélistes	Facteur de dilution						valeur	log ₁₀ de la valeur
	6400	3200	1600	800	400	200		
1	0	+	+	+	+	+	4525	3,66
2	0	+	+	+	+	+	4525	3,66
3	+	+	+	+	+	+	9050	3,96
4	+	+	+	+	+	+	9050	3,96
5	0	+	+	+	+	+	4525	3,66
6	+	+	+	+	+	+	9050	3,96
7	0	0	+	+	0	+	282	2,45
8	0	+	0	+	+	+	4525	3,66
9	+	+	+	+	+	+	9050	3,96
10	0	+	+	+	0	+	282	2,45
							Σlog ₁₀	35,35
							Σlog ₁₀ /n = Z	3,53
seuil de détection du groupe							10 ^Z	3427,34

0 : indique un essai manqué;
 + : indique un essai réussi;
 n : nombre de panélistes.

La Figure 40 présente l'évolution du seuil de détection d'odeur pour les différents traitements en fonction du temps. On note que les traitements ayant fait l'objet d'injection d'air atteignent après 90 jours un seuil de détection près de sept fois inférieure à celui atteint par le traitement n'ayant jamais reçu d'air. Ceci indique qu'il faut diluer une fraction solide non traitée sept fois plus qu'une fraction solide conditionnée pour en atténuer l'odeur. Les traitements ayant fait l'objet d'injection d'air présentent généralement un abattement d'odeur de plus de 80 % entre leur condition initiale et celle prévalant au jour 90. Pour leur part, les valeurs obtenues pour le traitement C0-M0 indiquent une tendance à la hausse du jour 60 au jour 90, ce qui est probablement attribuable à des conditions anaérobies prévalant dans les amas n'ayant jamais fait l'objet d'injection d'air.

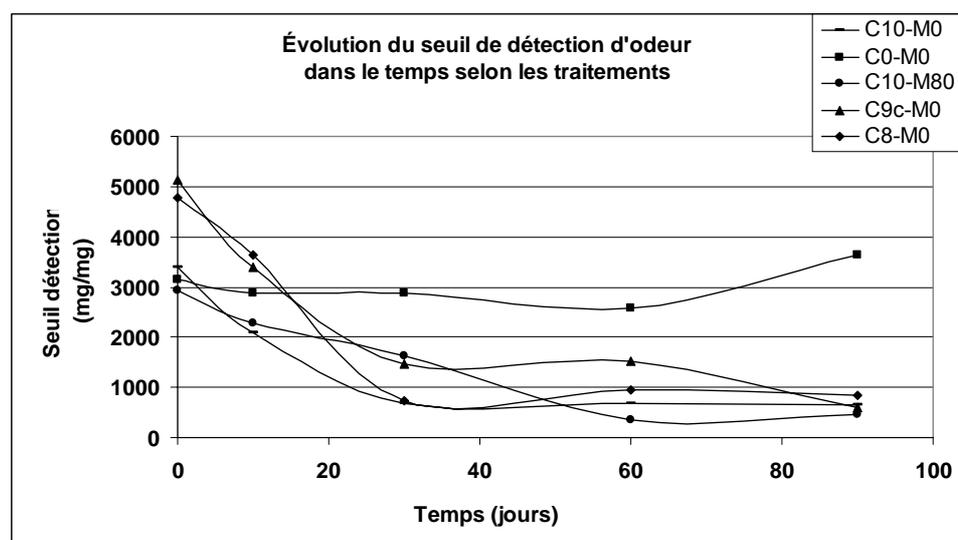


Figure 40: Évolution du niveau d'odeur selon les traitements

10.5 Évolution des agents pathogènes

Les graphiques des Figure 41 et 41 présentent les moyennes des résultats d'analyses microbiologiques effectuées au cours des traitements. Les échantillons prélevés seront caractérisés pour leur contenu en coliformes fécaux et *E. coli*.

L'examen de la Figure 41 permet de constater l'effet des traitements sur l'évolution des coliformes fécaux. On note pour les traitements C10-M0, C0-M0 et C10-M80 une augmentation importante des populations microbiennes pendant la période de maturation. Il semble que les conditions (humidité et température) qui ont prévalu dans les amas ayant reçu ces traitements ont été favorables au développement bactérien. Les amas ayant reçu le traitement C10-M80, soit celui qui prônait l'injection d'air durant toute la période de maturation, présentent la plus forte croissance bactérienne avec une population de coliformes fécaux 1000 fois plus importante à la fin du traitement qu'à son début. Les fractions solides ayant reçues les traitements C9c-M0 et C8-M0 démontrent quant à elles une stabilisation de la croissance microbienne dans le temps. Ces mêmes traitements atteignent l'objectif visé de moins de 1000 NPP à la fin de la période de maturation. L'examen de la Figure 42 permet de constater que les mêmes tendances s'observent selon les traitements avec les populations de *E. coli*.

De façon générale, il est reconnu que l'entreposage de lisier ou de fumier entraîne une diminution des populations de microorganismes indicateurs tels que *E. coli*, ce qui ne fut pas observé dans la présente étude. Les conditions aérobies découlant de l'aération combinées à une température adéquate semblent avoir favorisé la persistance et même la multiplication de *E. coli*. Très peu d'études ont été publiées sur l'assainissement de la phase solide du lisier par aération. Bhamidimarri et Pandey (1996) avaient observé une diminution des populations de streptocoques sous ces conditions. Selon ces auteurs, l'apport de carbone sous forme de paille semblait favoriser la réduction des populations de streptocoques. Il est possible que la décomposition des substances carbonées entraîne la formation de composés toxiques pour les bactéries entériques, ce qu'il a été impossible de constater dans la présente étude.

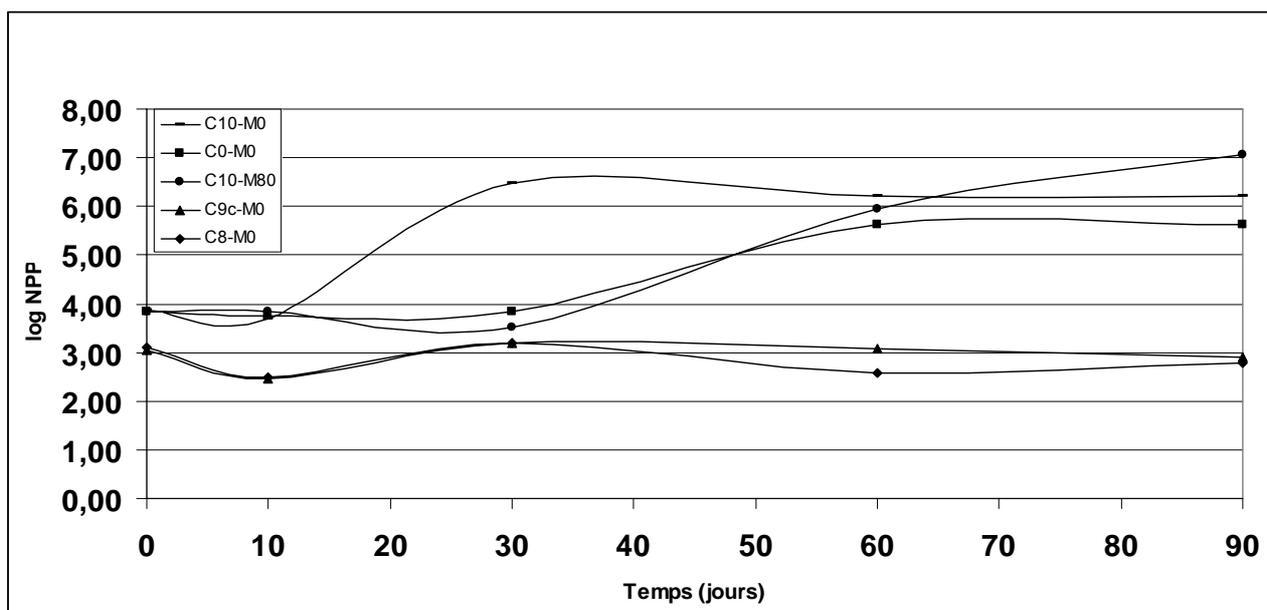


Figure 41: Population de coliformes fécaux selon les traitements

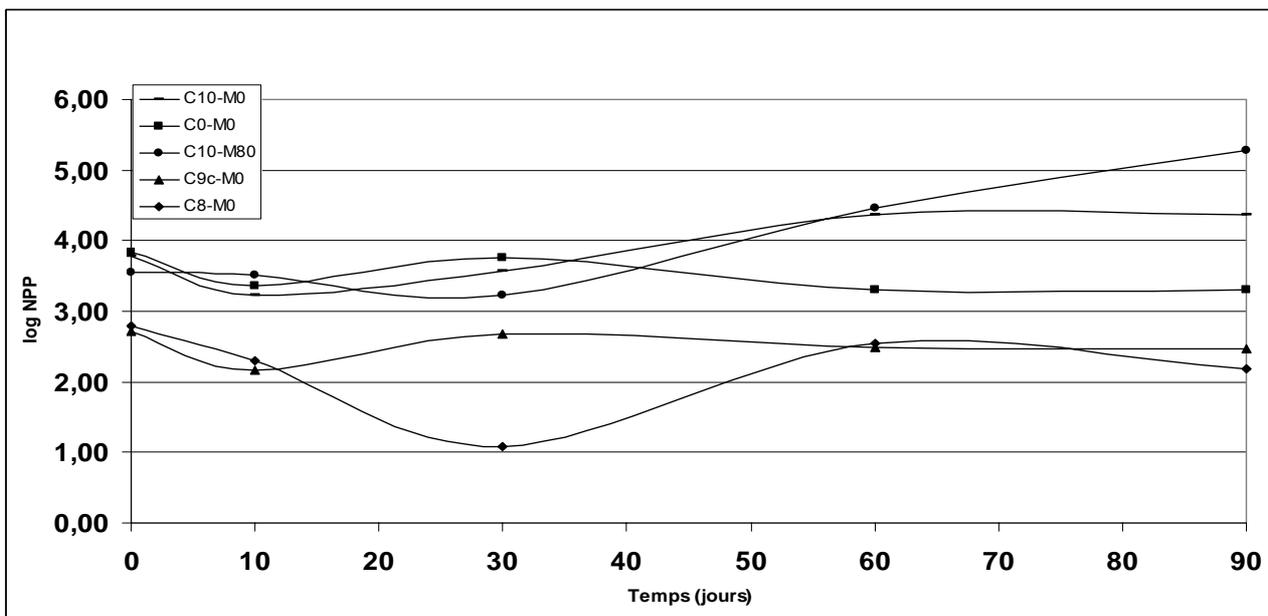


Figure 42: Population de *E.coli* selon les traitements

11 Analyse et discussion des essais de conditionnement de la fraction solide

11.1 Comparaison des traitements

Le Tableau 16 synthétise les résultats obtenus en utilisant des indicateurs de performances qui permettront de quantifier la performance des différents traitements au regard des objectifs fixés par le projet. Rappelons que les objectifs à l'égard de la fraction solide traitée sont:

- Une réduction de la teneur en eau ;
- Une réduction du contenu en agents pathogènes ;
- Un abattement d'odeur;
- Une modification positive de la composition physico-chimique au point de vue agronomique.

En conséquence, des réductions importantes des teneurs en eau, en coliformes fécaux et en odeur sont des données très positives pour un traitement. En contre-partie, les pertes en carbone et en azote doivent être minimisées pour donner des valeurs agronomique et économique intéressante à une fraction solide traitée. Le Tableau 17 constitue une grille d'évaluation permettant au final de comparer les traitements entre eux. La cote maximale de 5 est attribuée au traitement présentant le meilleur score pour chacun des traitements. À l'inverse, la cote minimale de 1 est attribuée au traitement présentant le pire score. Pour les indicateurs « eau, coliformes fécaux et odeur » la cote maximale est attribuée aux traitements présentant le plus de pertes, tandis que pour les indicateurs « carbone et azote total » la cote maximale est donnée aux traitements présentant le moins de pertes.

Tableau 16: Sommaire de la variation des indicateurs de performance au cours des traitements

Traitement	C0-M0	C10-M0	C10-M80	C8-M0	C9c-M0
Élément	Perte (-) ou gain(+) en %				
Eau	-41,68	-73,31	-61,36	-76,34	-75,05
Carbone	-53,29	-54,62	-55,71	-34,39	-35,40
Azote totale	-16,87	-23,04	-17,27	-41,24	-19,28
Coliformes fécaux	22131,22	6169,50	168548,16	-28,40	-51,74
Odeur	15,00	-81,00	-84,00	-82,00	-88,00

Tableau 17: Grille d'évaluation des performances des différents traitements

Traitement	C0-M0	C10-M0	C10-M80	C8-M0	C9c-M0
Élément	Rang				
Eau	1	3	2	5	4
Carbone	3	2	1	5	4
Azote totale	5	2	4	1	3
Coliformes fécaux	2	3	1	4	5
Odeur	1	2	4	3	5
Total	12	12	12	18	21

La grille d'analyse du Tableau 17 permet de constater que les traitements ayant fait l'objet d'une aération soutenue (C8-M0 et C9c-M0) au cours de la période de conditionnement pour permettre l'évacuation de la vapeur d'eau se distinguent des autres traitements. Le traitement C9c-M0 présente également un meilleur résultat global que le traitement C8-M0. Ceci est probablement attribuable à une perte en eau plus importante à la fin du cycle de conditionnement Figure 36(b) pour le traitement C9c-M0, ce qui permet de modifier rapidement les conditions de maturation et de minimiser les pertes à venir en élément fertilisant ou de favoriser la production d'odeur et d'agents pathogènes. Notons également que le traitement C9c-M0 présente une perte en eau de plus de 60 % après 20 jours de maturation (jour 30 d'observation, (Figure 36(b))), et que les autres indicateurs (Figure 36, 37 et 38) se rapprochent des valeurs obtenues en fin de maturation, ce qui permet d'envisager qu'une courte période d'entreposage serait suffisante pour permettre l'atteinte de caractéristiques fort intéressantes pour l'exportation d'une fraction solide ainsi conditionnée et entreposée.

L'autre constat que permet le Tableau 17 est que les traitements n'ayant fait l'objet que d'une ventilation intermittente (C10-M0 et C10-M80) ne présentent pas un meilleur résultat qu'un traitement sans aucune ventilation (C0-M0). En conséquence, il est inutile de ventiler de manière intermittente une fraction solide pendant le conditionnement pour espérer améliorer les propriétés de celle-ci. Une ventilation soutenue en fin de conditionnement est impérative pour obtenir de bons résultats.

D'un ordre plus général, les essais ont permis d'accumuler certaines observations quant aux traitements applicables à une fraction solide générée par un séparateur.

- A) Une aération passive (tuyau perforé sous un amas mais sans ventilation forcée par un ventilateur) n'offre que peu d'intérêt pour accélérer la maturation. Le même constat pour le conditionnement avait déjà été fait dans une expérience menée antérieurement (Trudelle *et al.*, 2005).

- B) Une aération intermittente même pratiquée pendant la période de maturation (C10-M80) n'apporte pas de modifications importantes à un amas comparé à un amas ne recevant aucune ventilation pendant son traitement (C0-M0). Pire, le traitement C10-M80 est le seul où la formation d'un peu de lixiviat a été constatée à la base des cellules de maturation alors qu'aucun écoulement n'a été observé pour les autres traitements.
- C) Les stratégies permettant d'évacuer rapidement l'eau pendant le conditionnement sont les plus souhaitables. Elles limitent les pertes en carbone et permettent un abattement rapide des odeurs et des coliformes fécaux. Pratiqué comme le traitement C9c-M0, les pertes en azote totale se rapprochent de celles observées dans les piles témoins (C0-M0).

11.2 Impact du traitement sur la valeur économique de la fraction solide

En retenant le traitement C9c-M0 pour évaluer les conséquences du conditionnement et de la maturation sur de la fraction solide, le Tableau 18 permet de comparer la valeur économique d'un produit d'origine par rapport à un produit traité. Pour effectuer cette comparaison le prix commercial en vigueur pour les principaux éléments fertilisants (N,P,K) a été utilisé. De même, les coefficients d'efficacité (CE) proposés par N'Dayegamiye et Landry (2003) pour une fraction solide de lisier de porc ont été appliqués afin de corriger la valeur fertilisante des fractions solides. L'application de ces paramètres permet d'évaluer qu'une fraction solide sortant du séparateur aurait une valeur monétaire théorique de 16,69\$ la tonne alors qu'une fraction solide ayant reçu le traitement C9c-M0 vaudrait théoriquement 30,76\$ la tonne. En considérant que le traitement C9c-M0 occasionne une perte de 54% de la matière (Tableau 14) de chaque tonne fraîche produite par le séparateur, il ne restera à la fin du procédé que 0,46 tonne. Aussi si chaque tonne fraîche produite par le séparateur pouvait être vendue, elle le serait à 16,69\$ de la tonne, toutefois à la fin du traitement on pourra vendre 0,46 tonne de produit à 30,76\$ pour une vente totale de 14,15\$. Il y aurait donc une perte économique théorique d'environ 15 % entre l'état frais et l'état traité d'une fraction solide, ce qui, somme tout, est bien peu pour favoriser une ouverture des marchés. Une fraction solide peu odorante et assainie pourrait plus facilement être épandue comme fertilisant en zone péri-urbaine, pensons notamment aux secteurs horticoles, aux terrains de golf, aux terrain de jeu et autres.

Tableau 18: Valeur commerciale théorique d'une fraction solide fraîche et traitée

	C9c-M0							
	jour 0				jour 90			
	kg/tonne	CE	\$/kg	\$/tonne	kg/tonne	CE	\$/kg	\$/tonne
N-TOTAL	12,23	0,45	2,07	11,39	21,43	0,45	2,07	19,96
P	9,99	0,65	0,54	3,51	19,98	0,65	0,54	7,01
K	2,77	0,90	0,72	1,80	5,84	0,90	0,72	3,79
C	174,44	-	-	-	244,62	-	-	-
Total				16,69				30,76

L'avantage du traitement prend toute sa signification pour les économies générées en frais de transport et de manutention pour exporter la fraction solide hors des zones en surplus. Par exemple, une production de 2 000 porcs-emplacements produisant annuellement près de 2 870 m³ de lisier brut à 7% de matières sèches générera, une fois séparée, 263 tonnes de fraction solide (Annexe III). Une fois cette fraction solide traitée, il restera 121 tonnes à transporter.

11.3 Intérêt agronomique de la fraction solide traitée

Du point de vue agronomique, la fraction solide traitée pourrait rivaliser d'intérêt avec des amendements organiques d'origines industrielle ou municipale pour son contenu en matière organique. À titre d'exemple le portrait agroenvironnemental des fermes québécoises (BPR-GREPA 1999) identifie la perte de matières organiques comme étant une problématique prioritaire associée à plusieurs cultures. Comme les rotations courtes ne suffisent pas à combler les déficits en carbone du sol, un apport extérieur en matières organiques stable (compost de ferme, boue, etc.) est recommandé. Le fort contenu en matières organiques de la fraction solide est un élément qui plaide en faveur de son utilisation. Par exemple, la culture de la pomme de terre est particulièrement touchée par cet enjeu. Elle puise dans le sol une quantité de matières organiques supérieure à la moyenne et laisse peu de résidus de culture. Comme sa production se fait en sols légers et bien drainés, l'absence de mesures d'amélioration des sols peut entraîner une détérioration accélérée de ceux-ci. Un déficit de $\sim 1800 \text{ kg C ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ est donc rapporté pour cette culture. Ce bilan négatif en matières organiques est très significatif puisqu'en améliorant le niveau de matières organiques des sols ($> 3\%$), on diminue la pression sur plusieurs indicateurs simultanément (ex. compaction, l'érosion). Cela réduit aussi les besoins en éléments fertilisants, dont le N minéral, et diminue par conséquent les risques d'acidification des sols.

En 2000, la Fédération des producteurs de pommes de terre du Québec (<http://www.fpptq.qc.ca/federation.htm>) adoptait un plan d'intervention favorisant la fertilisation intégrée et considérant comme prioritaire de promouvoir les engrais de ferme, de substituer les engrais de synthèse, d'informer sur les besoins en azote et phosphore de la pomme de terre et de réduire de 10% les engrais minéraux. La valorisation de la fraction solide traitée comme le propose le traitement C9c-M0 est en accord avec ces priorités puisque une application de 6 t ha^{-1} (soit la quantité nécessaire pour combler les besoins en P_2O_5 de la plante) apporterait $1\,468 \text{ kg}$ de carbone (tableau 10), ainsi qu'une quantité appréciable de N- P_2O_5 - K_2O (respectivement 58, 180 et 38 t ha^{-1} en tenant compte de leur CE respectif). La valeur fertilisante de l'azote organique serait également appréciable tel que l'ont démontré certains articles portant sur la valorisation de la fraction solide utilisant des plants de blé (Vasconcelos *et al.* 1997, Rodriguez *et al.* 2005, Cordovil *et al.* 2005). En résumé, la fraction solide riche en matières organiques, est bien pourvue azote organique, phosphore, calcium, et magnésium, ce qui lui confère la double qualité de matière fertilisante et d'amendement organique. En plus de contribuer à la nutrition de la culture, son application pourrait ainsi bénéficier indirectement aux rendements par son impact positif sur les propriétés physiques et biologiques du sol. Le rapport C/N indique en effet que le matériel se décomposerait facilement dans le sol, stimulant de ce fait les activités biologiques et enzymatiques du sol. Lors de la décomposition de la matière organique contenue dans ces substrats, les microorganismes du sol (champignons et bactéries) unissent et stabilisent les agrégats du sol. Ce processus favorise l'aération, la température, le régime hydrique, une meilleure croissance des racines des plantes et une nutrition accrue. Tous ces paramètres sont garants d'une bonne productivité végétale. La fraction solide se destine donc à être exportée vers les cultures ayant des besoins élevés en phosphore, particulièrement ceux dont les sols présentent un besoin en matières organiques. Étant donné la richesse en phosphore de la fraction solide, son application comblera tous les besoins en phosphore. Un ajustement en azote et en potassium de la fertilisation sera alors de rigueur pour combler la partie manquante de ces éléments.

11.4 Recommandations générales pour le conditionnement de la fraction solide

Certains constats émergent des essais effectués pour conditionner la fraction solide. À ce titre on note :

- Une ventilation continue permettant de maintenir une vitesse apparente à l'intérieur de la cellule de conditionnement peut être aussi basse que $0,0002 \text{ m s}^{-1}$ pour obtenir les conditions aérobies adéquates à l'obtention d'un régime thermophile à l'intérieur de l'amas.
- Une période de 10 jours de conditionnement, soit neuf jours à basse ventilation et un jour avec une ventilation de haut débit apparaît une combinaison favorable à l'obtention d'un substrat réduit en eau, en agents pathogènes et en odeur après 80 jours de maturation. La réduction rapide en eau permet également de conserver une partie importante du carbone et de l'azote au cours de l'entreposage. Une ventilation soutenue permettant quatre changements d'air à l'heure apparaît adéquate pour bien évacuer l'humidité accumulée dans les amas.
- En première estimation l'équation 9, adaptée de Higgins *et al.* (1982), permet d'estimer les pertes de charge à l'intérieur d'un amas. Les paramètres de l'équation 9 sont tirés d'essais laboratoires tels que préconisés par ces auteurs. Il s'agit en l'occurrence d'un montage expérimental permettant de mesurer les pertes de charge produite par un écoulement d'air au travers d'une colonne de substrat. Pour une fraction solide à 35 % de matières sèches et dont la source est un lisier de porcs à l'engraissement nourris avec une moulée préparée à la ferme, l'équation 9 prend la forme suivante :

$$\Delta P = 5,678 H^{1,226} V^{1,303} \quad (9)$$

Où :

- ΔP : Perte charge (cm H₂O) ;
- H : Hauteur de l'amas (m) ;
- V : Vitesse apparente (m min⁻¹).

Pour les cas où la fraction solide proviendra de porcs à l'engraissement nourris avec une moulée cubée, compte tenu que la masse volumique est près de 1,6 fois supérieure à celle observée d'une fraction solide provenant de porcs nourris avec une moulée préparée à la ferme, on pourra en première approximation doubler la valeur obtenue par l'équation 9. Les pertes de charge associées aux conduites et autres composantes pourront s'inspirer des relations développées par Higgins et Chen (1980), Rynk (1992) et Steel et Shove (1969).

- Conditionner les amas en appliquant une pression négative plutôt que positive permet d'installer un bio-filtre en aval des amas, ce qui permet de contrôler les odeurs pendant le traitement. En contre-partie, il faut prévoir les pertes de charges en conséquence. De plus, le ventilateur devra être conçu avec des matériaux résistants à la corrosion (acier inoxydable ou plastique) sinon sa vie utile ne sera que de très courte durée.
- Une salle chauffée de façon minimale (au dessus du point de congélation) devrait contenir les cellules de conditionnement, de manière à faciliter l'élévation des températures dans les amas. L'air injecté devrait également provenir de cette salle et non de l'extérieur afin d'éviter de refroidir les amas. Deux cellules de conditionnement pourraient être installées en parallèle, chacune évoluant selon deux

cycles de 10 jours. Le premier cycle de 10 jours sert au remplissage d'une cellule alors que le deuxième cycle de 10 jours permet le conditionnement des amas. Les deux cellules fonctionneront ainsi en alternance l'une étant en cycle de remplissage et l'autre en cycle de conditionnement. Une seule soufflerie sera ainsi utilisée en tout temps. À titre d'exemple, une porcherie de 2 000 porcs-emplacements, produisant du lisier ayant une siccité de 3,3% générera environ 5 263 m³ de lisier brut et 390 m³ de fraction solide annuellement (Annexe III). Pour conditionner cette fraction solide, l'entreprise devra utiliser deux cellules de conditionnement de 11 m³ chacune. En supposant une hauteur de 2 m, ces cellules pourraient avoir 3 m de large par 3 m de long. L'investissement prévisible pour de telles cellules construites en béton armée avec des murs de 0,6 m d'épaisseur serait d'environ 8 000\$ en incluant l'abri, la soufflerie, le plancher perforé et un convoyeur articulé permettant de charger alternativement les deux cellules. Amortie sur une période de 15 ans à un taux de 7% il en coûterait environ 870\$ par année, soit environ 0,16\$ par mètre cube de lisier brut produit ou à 0,15\$ par porc produit pour conditionner la fraction solide.

12 Conclusion des essais sur le conditionnement de la fraction solide

De tous les traitements réalisés, le conditionnement de la fraction solide effectué avec un faible débit de ventilation créant une vitesse d'écoulement d'air continu de 0,0002 m s⁻¹ pendant une période de neuf jours suivi d'un fort débit de ventilation pendant un jour s'est avéré le traitement le plus prometteur pour obtenir le maximum de résultats en vertu des objectifs du projet. Les résultats obtenus avec ce traitement indiquent à la fin de la période de maturation de 90 jours une réduction de la teneur en eau, en carbone, en azote total, en coliformes fécaux et en odeur respectivement de 75, 35, 19, 51 et 88%. Ces résultats démontrent qu'en utilisant les propriétés intrinsèques de la fraction solide à chauffer rapidement en présence d'air, on peut évaporer une grande quantité d'eau et ainsi « neutraliser » en quelque sorte l'activité microbienne et diminuer les pertes en éléments fertilisants. Les réductions des odeurs et des agents pathogènes est souhaitable pour augmenter le spectre d'application d'une fraction solide ainsi traitée, celle-ci pouvant désormais être épandue en zone péri-urbaine sans contrainte. La rapidité du conditionnement permet également de maintenir une importante source en carbone et en azote pendant la période de maturation. Après environ 30 jours de maturation, une fraction solide ainsi conditionnée a déjà atteint la majorité des propriétés favorisant son exportation.

Pour améliorer les caractéristiques de la fraction solide et favoriser son usage sur un large spectre, les frais d'implantation pour les équipements de conditionnement sont évalués à 0,15\$ par porc produit. Une fois conditionnée et entreposée, on peut évaluer la valeur d'une fraction solide traitée à 30,76\$ par tonne humide par rapport à son contenu en éléments fertilisants. Du point de vue agronomique, la fraction solide riche en matières organiques est bien pourvue en azote organique, phosphore, calcium, et magnésium, ce qui lui confère la double qualité de matière fertilisante et d'amendement organique. En plus de contribuer à la nutrition de la culture, son application pourrait ainsi bénéficier indirectement aux rendements par son impact positif sur les propriétés physiques et biologiques du sol. La fraction solide se destine donc à être exportée vers les cultures ayant des besoins élevés en engrais P et particulièrement aux sols nécessitant des besoins en matière organique. Concentrée, assainie et dépourvue d'odeur offensante, elle se destine à un bel avenir notamment en accédant à des créneaux qui étaient jusqu'à maintenant inaccessibles.

13 Troisième partie : Simulation technico-économique

La simulation suivante permet de quantifier l'impact économique d'une modification dans le système de gestion des engrais de ferme d'un élevage porcin en situation de surplus d'engrais de ferme, passant d'une régie conventionnelle de disposition du lisier à celle incorporant un séparateur décanteur-centrifuge, suivi du conditionnement et de l'entreposage de la fraction solide à la ferme. Les données utilisées pour décrire la ferme représentent un établissement porcin type situé en Chaudière-Appalaches. Le modèle prévisionnel développé dans ce projet est utilisé pour calculer la quantité de déjections produites par les animaux et les quantités d'effluents liquides et solides rejetées par le séparateur. Les analyses physico-chimiques du lisier brut et de la fraction liquide sont tirées d'un cas réel.

13.1 Description de la ferme et données de départ

- Ferme porcine croissance-finition de 2 000 porcs-emplacements;
 - Alimentation : Moulée cubée.
 - Superficies en propriété, cultures pratiquées et état de saturation des sols en P :
- | | |
|---|--|
| • 50 ha maïs-grain : | • 20 ha céréales : |
| • 15 ha : 151-250 kg P_{M3} * ha ⁻¹ (5-10% saturation) | • 6 ha : 151-250 kg P_{M3} ha ⁻¹ (5-10% saturation) |
| • 25 ha : 251-500 kg P_{M3} ha ⁻¹ (10% de saturation) | • 10 ha : 251-500 kg P_{M3} ha ⁻¹ (10% de saturation) |
| • 10 ha : >501 kg P_{M3} ha ⁻¹ | • 4 ha : >501 kg P_{M3} ha ⁻¹ |

*Mehlich 3

Doses de P_2O_5 permises selon REA (MEDDP, 2006) pour un rendement en maïs-grain entre 7 Tm ha⁻¹ à 15% d'humidité :

Sol 151-250 kg P_{M3} ha⁻¹ (5-10% saturation) : 75 kg P_2O_5 ha⁻¹
 Sol : 251-500 kg P_{M3} ha⁻¹ (10% de saturation) : 65 kg P_2O_5 ha⁻¹
 Sol : >501 kg P_{M3} ha⁻¹ : 40 kg P_2O_5 ha⁻¹

Doses de P_2O_5 permises selon REA pour des céréales :

Sol 151-250 kg P_{M3} ha⁻¹ (5-10% saturation) : 55 kg P_2O_5 ha⁻¹
 Sol : 251-500 kg P_{M3} ha⁻¹ (10% de saturation) : 45 kg P_2O_5 ha⁻¹
 Sol : >501 kg P_{M3} ha⁻¹ : 20 kg P_2O_5 ha⁻¹

Doses des autres éléments fertilisants selon les cultures (CRAAQ, 2003) :

maïs-grain : 160 kg ha⁻¹ de N
 50 kg ha⁻¹ de K_2O

céréales: 80 kg ha⁻¹ de N
 30 kg ha⁻¹ de K_2O

Analyses physico-chimique du lisier brut (analyses tirées d'un cas réel réalisé en Chaudières-Appalaches):

	MS	N _{total}	N-NH ₄	N ₀	NH ₄ /N _{tot}	P	P ₂ O ₅	K	K ₂ O
Lisier brut	3,3	2,8	1,37	1,46	0,49	0,81	1,85	1,0	1,2
Coefficient d'efficacité			95,0%	40,0%		80,0%		90,0%	

Production annuelle en lisier : 5 350 tonnes (selon le modèle prévisionnel développé dans ce projet)

13.2 Situation avant implantation d'un décanteur-centrifuge

En tenant compte des doses permises en P₂O₅, des surfaces disponibles, des cultures pratiquées, de la richesse des sols et d'un coefficient d'efficacité de 80 % pour le P₂O₅ du lisier, on peut déterminer la quantité de lisier brut que l'on peut épandre sur les terres possédées par l'éleveur soit :

- Pour les 50 hectares en maïs : 1 703 tonnes
- Pour les 20 hectares en céréales : 465 tonnes
- Total : 2 168 tonnes
- Quantité de lisier en surplus : 3 182 tonnes
- Déficit en azote à compenser par des engrais minéraux : 5 513 kg
- Déficit en K₂O à compenser par des engrais minéraux : 759 kg

Frais d'exploitation annuels selon le chiffrer OGF: frais d'épandage développé par Fertior en 2006 associés à l'épandage de la fraction liquide et aux limitations imposées en engrais de ferme suite à l'application du REA:

On supposera que les terres en propriété sont près de l'exploitation porcine, les frais d'épandage seront d'environ 3,36 \$ par tonne : 2 168 tonnes @ 3,36 \$ tonne⁻¹ : 7 284 \$

On supposera qu'il faut transporter l'excédant du lisier à 50 km de la ferme par un entrepreneur local dans un camion citerne contenant 27 tonnes de lisier et l'épandage se fera également par l'entrepreneur sur les terres de la ferme réceptrice :

3 182 tonnes @ \$8,58 tonne⁻¹ : 27 302 \$

Achat en engrais azoté pour les champs de l'éleveur: 5 513 kg @ 2,07 \$ kg⁻¹ : 11 412 \$

Achat en en K₂O pour les champs de l'éleveur : 759 kg @ 0,80 \$ kg⁻¹ : 607 \$

Coût de gestion annuel: **46 605 \$ ou 8,70 \$ par m³ de lisier brut ou 7,76 \$ par porc produit**

Doses des éléments fertilisants autres que le P_2O_5 selon les cultures (CRAAQ, 2003) :

maïs-grain : 160 kg ha⁻¹ de N
50 kg ha⁻¹ de K₂O

céréales: 80 kg ha⁻¹ de N
30 kg ha⁻¹ de K₂O

En tenant compte des doses permises en P_2O_5 , des surfaces disponibles, des cultures pratiquées, de la richesse des sols et d'un coefficient d'efficacité de 80% pour le P_2O_5 , on peut déterminer la quantité de fraction liquide que l'on peut épandre sur les terres possédées par l'éleveur soit :

Pour 50 hectares en maïs : 4 423 tonnes
Pour 11 hectares en céréales : 538 tonnes
Total : 4 961 tonnes

Achat en engrais azoté pour les champs de l'éleveur: 596 kg @ 2,07 \$ kg⁻¹ : 1 234 \$

Le fait d'utiliser une fraction liquide libère ainsi 9 hectares de terre à d'autres fins.

Frais d'exploitation annuels selon le chiffrier OGF: frais d'épandage (développé par Fertior en 2006) associés à l'épandage de la fraction liquide et aux limitations imposées en engrais de ferme suite à l'application du REA:

On supposera que les terres en propriété sont près de l'exploitation porcine, les frais d'épandage seront d'environ 3,36 \$ par tonne : 4 961 tonnes @ 3,36 \$ tonne⁻¹ : 16 669 \$

Transport de la fraction solide sur une terre réceptrice à 50 km de la ferme :
180 tonnes @ 9,30\$ tonne⁻¹ : 1 674 \$

Total annuel incluant les frais du traitement : **33 457 \$ ou 6,25 \$ par m³ de lisier brut ou 5,58 \$ par porc produit**

Économie annuelle générée par la séparation et l'entreposage à la ferme de la fraction solide par rapport à une gestion conventionnelle du lisier: 46 605 \$ - 33 457 \$ = **13 148 \$**

Période de retour sur l'investissement : 57 300\$/ 13 148 \$: **4,4 ans.**

Le tableau 19 résume les résultats de la simulation économique pour les 2 modes de gestion du lisier.

Tableau 19: Sommaire des résultats de la simulation économique

Mode de gestion	Coût de	Frais d'épandage	Frais de disposition	Frais d'achat d'engrais		Total	Coût par porc-produit
	traitement	sur terres en propriété	des surplus	N	K ₂ O		
	annuel						
	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$/porc-produit
Conventionnelle	nil	7 284	27 302	11 412	607	46 605	8
Avec séparateur décanteur-centrifuge	13 880	16 669	1 674	1 234	nil	33 457	5,58

13.4 Conclusion de l'analyse économique

Selon les hypothèses de travail retenues et en supposant que éleveur soit éligible à un support financier de la part de l'État par le biais du programme Prime-Vert, on peut estimer que l'utilisation d'un séparateur décanteur-centrifuge associée au conditionnement et à l'entreposage à la ferme de la fraction solide, pourrait permettre une économie d'environ 2,45 \$ par m³ de lisier brut ou 2,18 \$ par porc produit et que la période de retour sur les investissements sera d'environ 4 ans. À cela s'ajoute des bénéfices potentiels plus spéculatifs comme la libération de 9 hectares actuellement cultivés et la vente hypothétique de la fraction solide, celle-ci pouvant avoir une valeur économique théorique d'environ 31 \$ de la tonne humide, lorsqu'elle est conditionnée et entreposée comme le recommande ce rapport.

14 Conclusion du projet

Les résultats obtenus dans ce projet indiquent que le séparateur peut être ajusté aux particularités des lisiers issus de régimes alimentaires à base de moulée produite à la ferme ou à base de moulée cubée et ce, pour tous les types d'élevage porcins. Les performances du séparateur décanteur-centrifuge sont étroitement liées à la siccité du lisier brut à traiter. On note une efficacité de séparation du phosphore de près de 70% pour des lisiers dont la siccité est supérieure à 3%. Sous cette teneur en matières sèches, les performances de l'appareil décroissent rapidement. La capacité de traitement du séparateur, en terme du nombre de porcs-emplacements traités, croît également avec l'augmentation de la siccité du lisier. Cette relation entre les performances du séparateur et cette caractéristique du lisier met en lumière l'importance d'une gestion de l'eau optimisée dans le bâtiment d'élevage. Les essais menés au cours de ce projet, ont également permis de mettre en relation les caractéristiques du lisier brut et les caractéristiques des deux fractions générées. Ces relations ont permis l'élaboration d'un modèle prévisionnel permettant de dimensionner certaines composantes connexes du système de traitement et de prédire les efficacités de séparation de différents éléments.

La séparation du lisier avec un séparateur décanteur-centrifuge, suivi par le conditionnement et l'entreposage de la fraction solide à la ferme, peut permettre à une entreprise porcine faisant face à un surplus de lisier de diminuer ses coûts de gestion d'engrais de ferme en optimisant l'usage des terres situées à proximité de la ferme. Elle permet également de réduire les frais d'achats d'engrais minéraux en maximisant l'usage de l'azote disponible dans la fraction liquide ce qui n'était plus possible avec le lisier brut étant donné sa richesse en phosphore. Une fraction solide conditionnée et entreposée est à la fois un amendement et un engrais organique qui ne demande qu'à être valorisée. Dépourvue d'une odeur intense et assainie, son spectre d'application s'en trouve élargi.

De futurs travaux de recherche seraient maintenant nécessaires pour déterminer les réels coefficients d'efficacité de fertilisation des fractions solide et liquide, ceci afin de déterminer la pleine valeur agronomique et économique de ces nouveaux sous produits.

Références bibliographiques

ASTM. 1997. Standard practice for determination of odour and taste thresholds by a forced-choice ascending concentration series method of limits. No. E679-91: 34-38.

BARGAM. 2003. Decanter B/DF 300-300L. 3^e édition, User manual, Cingoly (MC), Italy, 31 pp.

Barrington, Choinière, Trigui et Knight. 2002. Compost airflow resistance. *Biosystems Engineering* 81(4): 433-441.

Bhamidimarri, et Pandey. 1996. Aerobic thermophilic composting of piggery solid wastes. *Wat. Sci.Tech.* 33(8): 89-94.

BNQ. 1997. Amendements organiques-composts. Bureau de normalisation du Québec, CAN/BNQ 0413-200, Québec, 25 pp.

BPR-GREPA. 1999. Le Portrait agroenvironnemental des fermes du Québec. Rapport présenté à l'Union des producteurs agricoles, MAPAQ, IRDA inc., Québec, 158 pp.

Cordovil, Coutinho, Goss et Cabral. 2005. Potentially mineralizable nitrogen from organic materials applied to a sandy soil: fitting the one-pool exponential model. *Soil Use and Management* 21: 65-72.

CRAAQ. 2003. Guide de référence en fertilisation. 1^{ère} édition, CRAAQ, Québec, 294 pp.

EPA. 1979. Criteria for classification of solid waste disposal facilities and practices. U.S. EPA Federal Register 44: 179.

Gigliotti, Kaiser, Guggenberger et Haumaier. 2002. Differences in the chemical composition of dissolved organic matter from waste material of different sources. *Biology and Fertility of Soils* 36: 321-329.

Giroux et Lemieux. 2000. Effets de la fertilisation N, P et K et leurs interactions sur le rendement d'une prairie à dominance de mil (*Phleum pratense* L.), la teneur en éléments nutritifs de la récolte et l'évolution de la fertilité des sols. *Agrosol* 11(1): 40-47.

Giusquiani, Concezzi, Businelli et Macchioni. 1998. Fate of pig sludge liquid fraction in calcareous soil: agricultural and environmental implications. *Journal of Environmental Quality* 27: 364-371.

Higgins et Chen. 1980. Design of airflow distributions systems for sewage sludge composting facilities. Rapport final, Candem composting project, Rutgers. State University, New Brunswick, 5 pp.

Higgins, Chen et Sigley. 1982. Airflow resistance in sewage sludge composting aeration systems. *Transaction of the ASSAE* 24(4): 1010-1014,1018.

Martin, Pouliot et Potvin. 2003. La séparation de phases, un incontournable. Colloque en agroenvironnement IRDA 2003. Cahier des conférences, IRDA, Drummondville, 10 novembre 2003, p.101-124.

- MENV. 2004. Guide sur la valorisation des matières résiduelles fertilisantes; Critères de référence et normes réglementaires. Ministère de l'Environnement du Québec, Direction du milieu rural. Bibliothèque nationale du Québec, Québec, 138 pp.
- Moller, Sommer et Ahring. 2002. Separation efficiency and particle size distribution in relation to manure type and storage conditions. *Bioresource Technology* 85:189-196.
- N'Dayegamiye et Landry. 2003. Valorisation agricole des sous-produits de lisier séparé. Colloque en agroenvironnement IRDA 2003. Cahier des conférences, IRDA, Drummondville, 10 novembre 2003, p.47-57.
- Poirier. 2005. Évaluation de trois méthodes rapides d'estimation de la valeur fertilisante (N, P, K) du lisier de porc provenant d'élevages de type croissance. Rapport scientifique, IRDA, Québec, 82 pp.
- Records et Sutherland. 2001. Decanter centrifuge handbook. 1^{ère} édition, Elsevier Science, Oxford, UK, 421 pp.
- Rodriguez, Guerrero, Moral, Ayguade et Mataix-Beneyto. 2005. Effects of composted and non-composted solid phase of pig slurry on N, P, and K contents in two Mediterranean soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 36: 635-647.
- Rynk.1992. On-Farm composting handbook. Northeast Regional Agricultural Engineering Service. Cooperative Extension. NRAES-54, NY, Ithaca, 186 pp.
- Sartaj, Fernandes et Patni. 1997. Performance of forced, passive and natural aeration method for composting manure slurries. *Transactions of ASAE* 40(2): 457-463.
- Seydoux, Côté, Grenier et Comité technique porc. 2005. Caractérisation des volumes et des concentrations en éléments fertilisants des déjections animales liquides en Chaudière-Appalaches. Rapport scientifique, IRDA, Québec, 76 pp.
- Steele et Shove. 1969. Design charts for flow and pressure distribution in perforated air ducts. *Transaction of ASAE* 12: 220.
- Tisdale, Nelson et Beaton. 1993. Soil fertility and fertilizers. 4th edition. Macmillan, New York, NY, 754 pp.
- Trudelle, Martin, Richard et Vigneux. 2005. Performances technico-économiques d'un séparateur centrifuge mobile à la fosse de lisier de porc. Rapport de recherche no. 2111 du CDAQ, Montréal, 78 p.
- Vasconcelos, Cabral et Cordovil. 1997. Effects of solid phase from pig slurry on soil chemical characteristics, nitrate leaching, composition and yield of wheat. *Journal of Plant Nutrition* 27 (7-8): 939-952.

Annexe I

Caractéristiques techniques de la centrifugeuse Asserva-300

Caractéristiques techniques de la centrifugeuse Asserva-300

Bol

- Forme : Cylindre conique
- Diamètre interne : 280 mm
- Longueur : 990 mm
- Révolution maximale : 4 800 tpm

Vis sans fin

- Différentiel de révolutions entre le bol et la vis :
Min. 9 tpm
Max 26 tpm

Général

- Moteur principal : 7.5 kW (11 Hp)
- Voltage : 600 V
- Ratio de la boîte d'engrenages : 1/59
- Poids: 850 kg

Annexe II

Résultats d'analyses physico-chimiques

Résultats d'analyses pour les éléments majeurs des échantillons de lisier de porcs à l'engraissement nourris avec de la moulée préparée à la ferme

Essais	N Total			P			K		
	LB ¹	FL ²	FS ³	LB	FL	FS	LB	FL	FS
	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	Mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
497-1	7545	7267	13080	1046	356	9587	3392	3521	2842
497-2	7725	7191	13202	1063	343	10133	3462	3522	2817
497-3	7709	6975	13712	1083	339	10794	3451	3492	2942
497-4	7737	7154	14232	1078	343	11188	3489	3508	2906
512-1	8056	7680	13040	1118	325	10222	3351	3441	2785
512-2	8049	7480	12106	1118	313	9203	3321	3383	2711
540-1	6843	6580	11649	991	373	8608	2946	3126	2326
540-2	6799	6520	11421	1024	356	7732	2920	3085	2401
540-3	6854	6538	10917	995	366	7369	2915	3104	2266
540-4	6896	6514	10834	1020	374	6762	3059	3126	2468
541-1	6906	6452	10953	1016	356	7396	2980	3022	2425
629-1	11344	11116	14130	2472	1041	10523	5298	5627	4297
629-2	11538	11031	14267	2492	934	9887	5351	5593	4262
630-3	11047	10408	14182	2379	830	9479	5138	4868	4074

1 : Lisier brut
2 : Fraction liquide
3 : Fraction solide

Résultats d'analyses pour les éléments mineurs des échantillons de lisier de porcs à l'engraissement nourris avec de la moulée préparée à la ferme

Essais	Ca			Mg			Cu			Zn		
	LB	FL	FS									
	mg/kg											
497-1	1569	998	10369	640	102	7203	nd	nd	nd	nd	nd	nd
497-2	1470	940	8028	646	98	7649	nd	nd	nd	nd	nd	nd
497-3	1787	932	7405	661	96	8156	nd	nd	nd	nd	nd	nd
497-4	1961	957	7527	653	96	8452	nd	nd	nd	nd	nd	nd
512-1	2312	950	14784	686	85	7584	nd	nd	nd	nd	nd	nd
512-2	2928	877	12912	679	78	6646	nd	nd	nd	nd	nd	nd
540-1	1684	959	7765	602	133	6318	24	21	47	42	31	188
540-2	2793	919	10046	618	126	5564	24	21	51	44	30	171
540-3	2013	939	14161	606	131	5313	24	21	49	42	30	160
540-4	1865	958	11967	615	132	4855	24	21	49	44	31	154
541-1	2340	906	13081	606	127	5221	25	20	52	42	29	159
629-1	2520	1867	5590	1168	185	6798	98	96	116	109	112	109
629-2	2414	1710	5372	1183	125	6398	98	93	124	109	107	117
630-3	2364	1610	5431	1138	139	6084	98	82	130	108	97	125

Résultats d'analyses pour les éléments majeurs des échantillons de lisier de porcs à l'engraissement nourris avec de la moulée cubée

Essais	N _{Total}			P			K		
	LB mg/kg	FL mg/kg	FS mg/kg	LB mg/kg	FL mg/kg	FS mg/kg	LB mg/kg	FL mg/kg	FS mg/kg
588-1	1381	1059	6839	386	254	2281	594	582	811
588-2	2215	1700	9814	638	293	5369	1077	1058	1301
588-3	2108	1580	9340	562	282	4370	1069	1057	1320
645-1	2806	2314	11261	798	291	9670	1029	1030	1306
649-1	2801	2314	10593	970	284	9606	1038	1041	1218

Résultats d'analyses pour les éléments mineurs des échantillons de lisier de porcs à l'engraissement nourris avec de la moulée cubée

Essais	Ca			Mg			Cu			Zn		
	LB mg/kg	FL mg/kg	FS mg/kg									
588-1	383	209	2953	247	155	1600	24,1	15,1	161,1	36,8	18,8	211,5
588-2	557	331	3393	404	147	3852	37,0	24,4	216,3	51,3	31,1	297,7
588-3	488	291	3100	345	147	3011	32,6	20,7	207,8	43,6	25,9	276,5
645-1	1070	625	10620	439	107	5989	34,7	27,2	150,0	77,8	55,2	434,6
649-1	1738	613	10576	504	103	6062	35,5	25,9	114,0	90,2	52,3	365,0

Résultats d'analyses pour les éléments majeurs des échantillons de lisier de porcs à la maternité nourris avec de la moulée préparée à la ferme

Essais	N _{Total}			P			K		
	LB mg/kg	FL mg/kg	FS mg/kg	LB mg/kg	FL mg/kg	FS mg/kg	LB mg/kg	FL mg/kg	FS mg/kg
547-1	1828	1715	7649	281	130	6726	809	804	1026
554-1	2801	2532	14533	616	201	18483	1234	1231	1439
560-1	2537	2311	11613	443	146	12512	1246	1260	1388
560-2	2566	2346	9781	484	153	10483	1262	1259	1369

Résultats d'analyses pour les éléments mineurs des échantillons de lisier de porcs à la maternité nourris avec de la moulée préparée à la ferme

Essais	Ca			Mg			Cu			Zn		
	LB mg/kg	FL mg/kg	FS mg/kg									
547-1	344	221	12609	170	60	4768	6.4	5.7	39.4	13.1	8.2	158.2
554-1	908	520	15939	374	64	13562	8.1	5.6	38.9	44.5	31.1	468.7
560-1	771	403	20660	263	49	8626	7.4	4.0	33.9	31.1	21.5	362.3
560-2	848	417	11870	290	48	7360	6.5	4.3	28.0	32.4	23.0	284.9

Annexe III

Résultats d'évaluation avec le modèle empirique développé

Résultats d'une évaluation avec le modèle empirique développé pour un élevage à l'engraissement :

Taux de matières sèches du lisier brut élevé

Modèle prévisionnel pour l'évaluation des principaux éléments centrifugeuse Asserva-300

060419

Production de lisier brut

Type d'élevage:	Engraissement*
Nb de porcs-emplacement réel:	2 000
Nb de porcs-emplacement maximal**:	2 908
Nb d'élevages/année:	3.2
Nb de porcs produit/année:	6 400
Volume de lisier brut produit/porcs-emplacement-jour (L):	4.2
Volume de lisier produit annuellement (m ³):	2 869
Masse de lisier produit annuellement (T):	2 967

*Moulange à la ferme et moulée cubée

**Pour un fonctionnement des appareils de 8 heures/jour

Données techniques du procédé

Ajustement de l'anneau:	4
Nb de jours de vide sanitaire:	21
Nb de jours de traitement:	344
Débit de lisier traité (m ³ /h):	1.5
Débit fraction liquide rejeté (m ³ /h):	1.4
Nb d'hres de fonct./jour:	5.5
Consom. électr. (kW-h):	7
Volume de lisier traité/j (m ³ /j):	8.3
débit masse lisier (kg/h):	1567.6
débit masse FL (kg/h):	1428.7
débit masse FS (kg/h):	138.9

Caractéristiques physico-chimiques unitaires des fractions

	LB ¹	FS ²	FL ³
Siccité (%):	7.0	34.0	4.4
Masse vol. (kg/m ³):	1034	600	1000
N _{total} (kg/T):	6.2	9.7	5.8
P ₂ O ₅ (kg/T):	3.7		
P _{total} (kg/T):	1.6	12.7	0.6
K ₂ O (kg/T):	3.6		
K _{total} (kg/T):	3.0	2.3	3.1

Efficacités de séparation

Taux de capture de MS (%):	43.1
Taux de capture de N _{total} (%):	14.0
Taux de capture de P _{total} (%):	69.0
Taux de capture de K _{total} (%):	6.7

Consommation énergétique

Dépense électrique/jour:	2.50\$
Dépense électrique/année:	861\$

Quantité annuelle de solide et de nutriments retrouvés dans les fractions

	LB	FS	FL
MS (T):	207.7	89.5	118.2
N _{total} (T):	18.3	2.6	15.8
P _{total} (T):	4.8	3.3	1.5
K _{total} (T):	8.9	0.6	8.3

1- LB: Lisier brut

2- FS: Fraction solide

3- FL: Fraction liquide

Entreposage de la fraction solide

Masse de FS générée/jour (T)*:	0.8
Vol. de FS générée/jour (m ³)*:	1.3
Masse de FS générée/an (T):	262.9
Volume de FS générée/an (m ³):	438.2
Hauteur d'entreposage (m):	3
Superficie d'entreposage (m ²)**:	73.0

*par jour de traitement - **Pour la moitié de l'année

Entreposage de la fraction liquide

Vol. de FL générée/jour (m ³)*:	7.9
Volume de FL générée/an (m ³):	2704
Réduction du volume de liquide (%):	6

Résultats d'une évaluation avec le modèle empirique développé pour un élevage à l'engraissement :

Taux de matières sèches du lisier brut faible

Modèle prévisionnel pour l'évaluation des principaux éléments centrifugeuse Asserva-300

060419

Production de lisier brut

Type d'élevage:	Engraissement*
Nb de porcs-emplacement réel:	2 000
Nb de porcs-emplacement maximal**:	2 180
Nb d'élevages/année:	3.2
Nb de porcs produit/année:	6 400
Volume de lisier brut produit/porcs-emplacement-jour (L):	7.7
Volume de lisier produit annuellement (m ³):	5 263
Masse de lisier produit annuellement (T):	5 350

*Moulange à la ferme et moulée cubée

**Pour un fonctionnement des appareils de 8 heures/jour

Données techniques du procédé

Ajustement de l'anneau:	4
Nb de jours de vide sanitaire:	21
Nb de jours de traitement:	344
Débit de lisier traité (m ³ /h):	2.1
Débit fraction liquide rejeté (m ³ /h):	2.0
Nb d'hres de fonct./jour:	7.3
Consom. électr. (kW-h):	7
Volume de lisier traité/j (m ³ /j):	15.3
débit masse lisier (kg/h):	2119.3
débit masse FL (kg/h):	1965.0
débit masse FS (kg/h):	154.3

Caractéristiques physico-chimiques unitaires des fractions

	LB ¹	FS ²	FL ³
Siccité (%):	3.3	18.7	2.1
Masse vol. (kg/m ³):	1016	600	1000
N _{total} (kg/T):	3.4	5.9	3.3
P ₂ O ₅ (kg/T):	1.8		
P _{total} (kg/T):	0.8	7.0	0.3
K ₂ O (kg/T):	2.0		
K _{total} (kg/T):	1.7	1.1	1.7

Efficacités de séparation

Taux de capture de MS (%):	41.2
Taux de capture de N _{total} (%):	12.5
Taux de capture de P _{total} (%):	63.9
Taux de capture de K _{total} (%):	5.0

Consommation énergétique

Dépense électrique/jour:	3.34\$
Dépense électrique/année:	1 149\$

Quantité annuelle de solide et de nutriments retrouvés dans les fractions

	LB	FS	FL
MS (T):	176.6	72.8	103.8
N _{total} (T):	18.4	2.3	16.1
P _{total} (T):	4.2	2.7	1.5
K _{total} (T):	8.9	0.4	8.4

Entreposage de la fraction solide

Masse de FS générée/jour (T)*:	1.1
Vol. de FS générée/jour (m ³)*:	1.9
Masse de FS générée/an (T):	389.5
Volume de FS générée/an (m ³):	649.1
Hauteur d'entreposage (m):	3
Superficie d'entreposage (m ²)**:	108.2

*par jour de traitement - **Pour la moitié de l'année

1- LB: Lisier brut

2- FS: Fraction solide

3- FL: Fraction liquide

Entreposage de la fraction liquide

Vol. de FL générée/jour (m ³)*:	14.4
Volume de FL générée/an (m ³):	4961
Réduction du volume de liquide (%):	6