

Université du Québec
Institut national de la recherche scientifique
Eau, Terre et Environnement

**DÉVELOPPEMENT D'UNE TECHNOLOGIE DE TRAITEMENT DU LISIER
PORCIN PAR FLOTTATION BIOLOGIQUE**

par
Geneviève Bélanger
Ing. Stag. - Génie civil

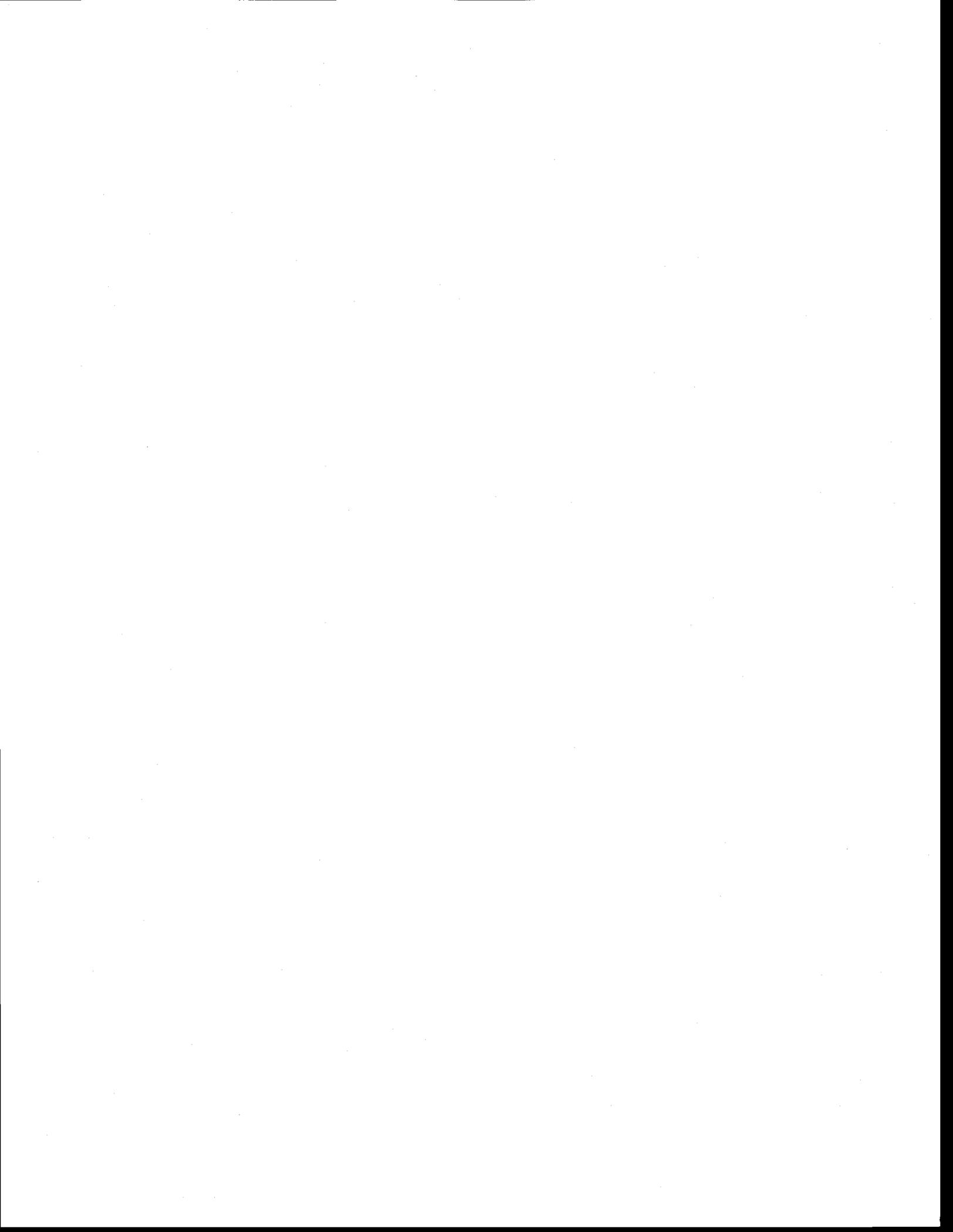
Mémoire présenté
pour l'obtention du grade de Maître ès sciences (M.Sc.)

Jury d'évaluation

Examineur Externe	Monsieur Peter Jones Département de génie chimique Université de Sherbrooke
Examineur Interne	Monsieur Rajeshwar Dayal Tyagi INRS-ETE Université du Québec
Directeur de recherche	Monsieur Jean-François Blais INRS-ETE Université du Québec
Codirecteur de recherche	Monsieur Guy Mercier INRS-ETE Université du Québec

Avril 2002

© Droits réservés de Geneviève Bélanger



REMERCIEMENTS

Je remercie mon directeur de thèse, Jean-François Blais, et mon codirecteur, Guy Mercier, pour leurs conseils et leur disponibilité à répondre à mes interrogations. Je tiens également à exprimer ma reconnaissance aux évaluateurs externes pour leur travail. J'exprime aussi ma gratitude à Sandra Imbeault et à Danielle Leblanc pour leur contribution à mes travaux. Je ne veux pas passer sous silence mes collègues d'étude de même que le personnel de l'INRS-ETE et de l'IRDA qui m'ont épaulée tout au long de ma maîtrise. Je dis un gros MERCI à ma famille et à Dominique pour leurs encouragements. Enfin, je remercie l'INRS-ETE et le FCAR pour leur soutien financier.



RÉSUMÉ

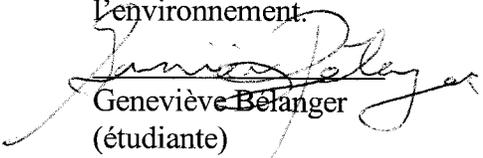
Le présent projet de recherche vise à démontrer le potentiel d'une technologie de séparation du lisier de porc par flottation biologique avec polissage optionnel de la fraction liquide sur un filtre à base de tourbe. La séparation des lisiers de maternité, d'engraissement et de pouponnière en des fractions liquide et solide a été optimisée en laboratoire préalablement aux expérimentations du procédé de séparation à l'échelle du laboratoire et à l'échelle pilote. Les fonctionnements en mode cuvée et en mode continu du procédé ont été étudiés lors de ces essais. Les performances d'un filtre de tourbe ont été observées parallèlement aux essais à l'échelle pilote.

Dans un premier temps, l'optimisation de la séparation de phases des trois types de lisiers à l'étude a mené aux conclusions qui suivent. Les polymères cationiques sont les meilleurs pour la séparation du lisier de porc. Les choix de polymères sont : Zetag 7557 pour les lisiers de maternité et de pouponnière, et LPM 9511 pour le lisier d'engraissement. La concentration optimale de polymère à ajouter est d'environ 16 % v.v⁻¹. Le temps requis pour la flottation se situe entre 6 et 24 h.

Dans un second temps, les expérimentations du procédé de séparation pour des lisiers de maternité, d'engraissement et de pouponnière à l'échelle du laboratoire et à l'échelle pilote démontrent qu'il est possible de séparer le lisier de porc par flottation pour diverses conditions (lisiers, temps de rétention, charges hydrauliques et en solides). Le mode de fonctionnement en continu tend à offrir des performances d'enlèvement comparables à celles du mode de fonctionnement en cuvée. Le critère du ratio $N-NH_4^+/P_t$ de la fraction liquide est respecté pour tous les essais. Pour ce qui est du critère de siccité de la fraction solide, il est difficile à atteindre avec la présente configuration du procédé. En mode de fonctionnement continu, la stabilité des concentrations des paramètres de la fraction liquide et de la fraction solide en fonction du temps est satisfaisante. Il importe de mentionner que l'utilisation du filtre de tourbe a été exclue puisqu'il n'est pas nécessaire à l'atteinte du critère du ratio $N-NH_4^+/P_t$, et qu'il présente des problèmes d'opération (colmatage, faibles charges hydrauliques).

Dans un troisième temps, les coûts totaux encourus pour le traitement du lisier par flottation biologique sont inférieurs à 5 \$·m⁻³ de lisier brut traité pour des volumes annuels de lisier supérieurs à 3 900 m³·an⁻¹. Les coûts totaux sont davantage influencés par les coûts de main d'œuvre.

En somme, le potentiel de la technologie de séparation du lisier porcin par flottation biologique est démontré. Le procédé de traitement par séparation permet d'extraire des fractions liquide et solide présentant un potentiel de valorisation favorable pour l'environnement.


Geneviève Bélanger
(étudiante)


Jean-François Blais
(directeur de recherche)



TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	III
RÉSUMÉ	V
TABLE DES MATIÈRES.....	VII
Liste des tableaux	XIII
Liste des figures	XVII
Liste des équations.....	XIX
Liste des abréviations.....	XXI
INTRODUCTION.....	1
1. REVUE DE LITTÉRATURE	3
1.1 DÉFINITION ET TYPES DE LISIER DE PORC	3
1.2 COMPOSANTES DU LISIER DE PORC	4
1.2.1 <i>Éléments nutritifs</i>	5
1.2.2 <i>Matières organiques</i>	6
1.2.3 <i>Microorganismes</i>	6
1.2.4 <i>Métaux lourds</i>	6
1.2.5 <i>Inventaire des caractéristiques du lisier de porc</i>	7
1.3 TYPES DE GESTION DES REJETS DE LISIER.....	8
1.3.1 <i>Gestion sous forme liquide</i>	8
1.3.2 <i>Gestion sous forme solide-liquide</i>	9
1.3.3 <i>Gestion sous forme solide</i>	10
1.4 PROBLÉMATIQUE DE LA GESTION DES REJETS DE LISIER	10
1.4.1 <i>Contamination des eaux</i>	11
1.4.1.1 <i>Eaux de surface</i>	11

1.4.1.2	Eaux souterraines	12
1.4.2	<i>Pollution de l'air</i>	13
1.4.3	<i>Dégradation des sols agricoles</i>	14
1.4.4	<i>Déforestation et assèchement de milieux humides</i>	14
1.5	STRATÉGIES ENVIRONNEMENTALES DE GESTION DU LISIER	15
1.5.1	<i>Mesures préalables à l'implantation d'un traitement du lisier de porc</i>	15
1.5.1.1	Diminution de la charge en éléments fertilisants du lisier.....	15
1.5.1.2	Diminution du volume de lisier produit.....	16
1.5.1.3	Atténuation des odeurs.....	16
1.5.2	<i>Traitement du lisier porcin à implanter</i>	17
1.6	TECHNOLOGIES DE TRAITEMENT EXISTANTES.....	18
1.6.1	<i>Procédés mécaniques</i>	18
1.6.1.1	Séparation mécanique	18
1.6.1.2	Filtration	18
1.6.2	<i>Procédés biologiques</i>	19
1.6.2.1	Traitement aérobie.....	19
1.6.2.2	Traitement anaérobie.....	20
1.6.2.3	Compostage.....	20
1.6.2.4	Marais filtrants.....	21
1.6.3	<i>Procédés chimiques</i>	23
1.6.3.1	Acidification, oxydation et chaulage.....	23
1.6.4	<i>Procédés thermiques</i>	24
1.6.4.1	Séchage.....	24
1.6.5	<i>Procédés physico-chimiques</i>	25
1.6.5.1	Oligolyse.....	25
1.6.5.2	Décantation avec coagulation et/ou floculation.....	25
1.6.6	<i>Technologies de traitement commercialisables</i>	26
1.6.7	<i>Technologie de traitement sujet du présent mémoire</i>	29
1.7	TECHNOLOGIE DE TRAITEMENT DU LISIER DE PORC PAR FLOTTATION BIOLOGIQUE	30
1.7.1	<i>Flottation biologique</i>	31

1.7.1.1 Définitions et applicabilité au lisier de porc	31
1.7.1.2 Théorie de la flottation provoquée	32
1.7.1.3 Mécanismes de génération de bulles de gaz	34
1.7.1.4 Paramètres de conception et d'opération	35
1.7.1.5 Système d'élimination des boues de fond.....	36
1.7.1.6 Système d'élimination des boues flottées	36
<i>1.7.2 Coagulation-floculation</i>	<i>37</i>
1.7.2.1 Définitions et mécanismes	37
1.7.2.2 Nature et particularités des polymères synthétiques.....	38
1.7.2.3 Applications au lisier de porc.....	40
<i>1.7.3 Polissage sur filtre de tourbe</i>	<i>41</i>
1.7.3.1 Présentation de la tourbe et de ses mécanismes d'épuration.....	41
1.7.3.2 Performances des filtres à base de tourbe	41
1.7.3.3 Amélioration des propriétés de la tourbe par dopage	42
1.8 CRITÈRES D'ÉVALUATION DES TECHNOLOGIES	43
1.8.1.1 Ratio azote ammoniacal/phosphore total de la fraction liquide	44
1.8.1.2 Siccité de la fraction solide	45
1.8.1.3 Coûts du traitement du lisier	45
1.9 VALORISATION DES SOUS-PRODUITS.....	45
1.10 BUT DE LA RECHERCHE.....	47
1.11 OBJECTIFS SPÉCIFIQUES DE RECHERCHE ET DÉMARCHE EXPÉRIMENTALE	47
2. DÉMARCHE MÉTHODOLOGIQUE	51
2.1 MATÉRIEL ET PRODUITS.....	51
2.1.1 <i>Lisier de porc.....</i>	<i>51</i>
2.1.2 <i>Agents de conditionnement.....</i>	<i>52</i>
2.1.3 <i>Matières carbonées</i>	<i>53</i>
2.2 DESCRIPTION DES ESSAIS	53
2.2.1 <i>Essais de séparation.....</i>	<i>54</i>
2.2.1.1 Tests de l'efficacité des boues rouges et de la poussière de sablage.....	55

2.2.1.2	Tests de polymères	56
2.2.1.3	Tests de flottation en colonnes.....	59
2.2.1.4	Tests de flottation en cônes	60
2.2.1.5	Étude des gaz dégagés lors de la flottation biologique.....	61
2.2.2	<i>Essais de flottation en laboratoire</i>	62
2.2.2.1	Description et fonctionnement du montage expérimental.....	62
2.2.2.2	Essais en mode cuvée.....	63
2.2.2.3	Essais en mode continu	64
2.2.3	<i>Essais de flottation à l'échelle pilote</i>	65
2.2.3.1	Description et fonctionnement du montage expérimental.....	65
2.2.3.2	Essais en mode cuvée.....	67
2.2.3.3	Essai en mode continu.....	68
2.2.3.4	Suivi des performances d'un filtre à base de tourbe.....	69
2.3	MÉTHODES ANALYTIQUES	70
3.	RÉSULTATS ET DISCUSSION	73
3.1	ESSAIS DE SÉPARATION.....	73
3.1.1	<i>Étude de l'efficacité des boues rouges et de la poussière de sablage</i>	73
3.1.2	<i>Tests de polymères</i>	75
3.1.3	<i>Tests de flottation en colonnes</i>	80
3.1.4	<i>Tests de flottation en cônes</i>	83
3.1.5	<i>Étude préliminaire des gaz dégagés lors de la flottation biologique</i>	88
3.2	ESSAIS DE FLOTTATION EN LABORATOIRE.....	90
3.2.1	<i>Essais en mode cuvée</i>	91
3.2.2	<i>Essais en mode continu</i>	93
3.2.2.1	Performances de la séparation des lisiers de maternité, de pouponnière et d'engraissement	93
3.2.2.2	Stabilité des performances de séparation dans le temps.....	96
3.2.2.3	Conclusion des essais en mode continu.....	103
3.2.2.4	Comparaison entre les rendements de séparation en mode cuvée et en	

mode continu.....	103
3.3 ESSAIS DE FLOTTATION À L'ÉCHELLE PILOTE	104
3.3.1 <i>Observations visuelles de la séparation de phases par flottation biologique</i>	104
3.3.2 <i>Essais en mode cuvée</i>	105
3.3.3 <i>Essais en mode continu</i>	108
3.3.3.1 Performances de la séparation du lisier d'engraissement	109
3.3.3.2 Stabilité des performances de séparation dans le temps.....	112
3.3.3.3 Conclusion des essais en mode continu.....	114
3.3.3.4 Comparaison entre les rendements de séparation en mode cuvée et en mode continu pour le lisier d'engraissement.....	114
3.3.3.5 Étude des paramètres de conception et d'opération utilisés pour la séparation du lisier par flottation biologique en mode continu	115
3.3.4 <i>Suivi des performances d'un filtre à base de tourbe</i>	117
3.4 ANALYSES ÉCONOMIQUES	121
CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS.....	127
RÉFÉRENCES.....	131
ANNEXE A	145
ANNEXE B	149
ANNEXE C	153
ANNEXE D	163
ANNEXE E	181



LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1	<i>Informations générales sur les lisiers de maternité, de pouponnière et d'engraissement au Québec</i>	4
Tableau 2	<i>Caractéristiques physiques, chimiques et biologiques du lisier de porc</i>	7
Tableau 3	<i>Avantages et inconvénients des procédés mécaniques</i>	19
Tableau 4	<i>Avantages et inconvénients des procédés biologiques</i>	22
Tableau 5	<i>Avantages et inconvénients des procédés chimiques</i>	24
Tableau 6	<i>Avantages et inconvénients des procédés thermiques</i>	24
Tableau 7	<i>Avantages et inconvénients des procédés physico-chimiques</i>	26
Tableau 8	<i>Synthèse des détails techniques et économiques des technologies commercialisables</i>	27
Tableau 9	<i>Classification des procédés de flottation</i>	31
Tableau 10	<i>Paramètres de conception et d'opération d'un flottateur à air dissous</i>	36
Tableau 11	<i>Critères d'évaluation des technologies émergentes</i>	43
Tableau 12	<i>Détails des échantillonnages de lisier</i>	52
Tableau 13	<i>Descriptions et codes des essais réalisés au cours de la recherche</i>	54
Tableau 14	<i>Composition des mélanges pour les essais avec les boues rouges et/ou la poussière de sablage</i>	55
Tableau 15	<i>Noms et caractéristiques des polymères utilisés pour l'essai PO01</i>	57
Tableau 16	<i>Noms et caractéristiques des polymères utilisés pour l'essai PO02</i>	58
Tableau 17	<i>Grilles d'évaluation de la qualité des floculats, de la séparation et du surnageant</i>	59
Tableau 18	<i>Conditions des essais en mode continu à l'échelle du laboratoire</i>	64
Tableau 19	<i>Détails techniques relatifs à l'opération du filtre à base de tourbe</i>	70
Tableau 20	<i>Pourcentages d'enlèvement des PO_4^{3-} des essais avec les boues rouges et la poussière de sablage</i>	74
Tableau 21	<i>Synthèse des meilleurs résultats des essais de flottation en colonnes</i>	82
Tableau 22	<i>Caractéristiques des lisiers utilisés pour les tests de flottation en cônes</i>	83
Tableau 23	<i>Distribution et valeurs des cotes pour le calcul de l'indice composé de la qualité de la flottation</i>	84
Tableau 24	<i>Distribution et valeurs des cotes pour le calcul de l'indice composé de la mesure de la flottation</i>	85
Tableau 25	<i>Synthèse des résultats des essais de flottation en cônes</i>	86
Tableau 26	<i>Caractéristiques des fractions liquides (FL) générées lors des essais de flottation en laboratoire en mode cuvée ; lisier de maternité ; polymère Zetag 7557</i>	91
Tableau 27	<i>Caractéristiques des fractions solides (FS) générées lors des essais de flottation en laboratoire en mode cuvée ; lisier de maternité ; polymère Zetag 7557</i>	92

Tableau 28	Caractéristiques moyennes des fractions liquides (FL) générées lors des essais de flottation en laboratoire en mode continu	94
Tableau 29	Caractéristiques moyennes des fractions solides (FS) générées lors des essais de flottation en laboratoire en mode continu	95
Tableau 30	Caractéristiques des fractions liquides (FL) générées lors des essais de flottation en mode cuvée à l'échelle pilote	106
Tableau 31	Caractéristiques des fractions solides (FS) générées lors des essais de flottation en mode cuvée à l'échelle pilote	108
Tableau 32	Caractéristiques des fractions liquides (FL) générées lors de l'essai de flottation en mode continu à l'échelle pilote ; lisier d'engraissement ; TRH = 22 h ; polymère LPM 9511	110
Tableau 33	Caractéristiques des fractions solides (FS) générées lors de l'essai de flottation en mode continu à l'échelle pilote ; lisier d'engraissement ; TRH = 22 h ; polymère LPM 9511	112
Tableau 34	Synthèse des paramètres de conception et d'opération des essais en mode de fonctionnement continu	116
Tableau 35	Caractéristiques des fractions liquides filtrées (FLF) générées lors des essais de flottation en mode cuvée et en mode continu à l'échelle pilote.....	118
Tableau 36	Prix des polymères organiques utilisés pour la séparation du lisier de porc.....	123
Tableau 37	Avantages et inconvénients escomptés de la nouvelle technologie.....	129
Tableau 38	Valeurs du coefficient de traînée pour différents régimes hydrauliques	147
Tableau 39	Valeurs du facteur de sphéricité	148
Tableau 40	Synthèse des résultats de l'essai COL01 ; lisier de maternité ; Zetag 7654.....	150
Tableau 41	Synthèse des résultats de l'essai COL02 ; lisier de maternité ; Zetag 7557.....	151
Tableau 42	Synthèse des résultats de l'essai COL03 ; lisier de maternité ; Zetag 7557.....	152
Tableau 43	Caractéristiques du lisier brut (LB) et de la fraction liquide (FL) résultant de traitements en mode cuvée ; lisier de maternité ; Zetag 7557.....	154
Tableau 44	Caractéristiques de la fraction solide (FS) résultant de traitements en mode cuvée ; lisier de maternité ; Zetag 7557	155
Tableau 45	Concentrations en solides, en nutriments et en DCO, des lisiers bruts de maternité, de pouponnière et d'engraissement	156
Tableau 46	Concentrations en solides, en nutriments et en DCO, des fractions liquides générées à partir des lisiers de maternité, de pouponnière et d'engraissement.....	157
Tableau 47	Concentrations en solides, en nutriments et en DCO, des fractions solides générées à partir des lisiers de maternité, de pouponnière et d'engraissement	158
Tableau 48	Coefficients de variation des concentrations pour les lisiers des essais en mode continu à l'échelle du laboratoire	160
Tableau 49	Coefficients de variation des concentrations des fractions liquides générées à partir des lisiers	

	<i>des essais en mode continu à l'échelle du laboratoire</i>	160
Tableau 50	<i>Coefficients de variation des concentrations des fractions solides générées à partir des lisiers des essais en mode continu à l'échelle du laboratoire</i>	161
Tableau 51	<i>Concentrations des solides, des nutriments et de la DCO₁ pour les lisiers bruts utilisés lors des essais en mode cuvée à l'échelle pilote</i>	164
Tableau 52	<i>Concentrations en solides, en nutriments et en DCO₁ des fractions liquides générées lors des essais en mode cuvée à l'échelle pilote</i>	165
Tableau 53	<i>Concentrations en solides, en nutriments et en DCO₁ pour les fractions solides générées au cours des essais en mode cuvée à l'échelle pilote</i>	166
Tableau 54	<i>Coefficients de variation des concentrations des lisiers bruts des essais en mode cuvée à l'échelle pilote</i>	167
Tableau 55	<i>Coefficients de variation des concentrations des fractions liquides générées à partir des lisiers des essais en mode cuvée à l'échelle pilote</i>	167
Tableau 56	<i>Coefficients de variation concentrations des fractions solides générées à partir des lisiers des essais en mode cuvée à l'échelle pilote</i>	168
Tableau 57	<i>Concentrations en solides, en nutriments et en DCO₁ pour les lisiers bruts utilisés pour l'essai en mode continu à l'échelle pilote ; lisier d'engraisement ; polymère LPM 9511 ; TRH = 22 h</i>	170
Tableau 58	<i>Coefficients de variation des concentrations des lisiers bruts des essais en mode continu à l'échelle pilote</i>	171
Tableau 59	<i>Coefficients de variation des concentrations des fractions liquides générées à partir des lisiers des essais en mode continu à l'échelle pilote</i>	171
Tableau 60	<i>Coefficients de variation des concentrations des fractions solides générées à partir des lisiers des essais en mode continu à l'échelle pilote</i>	172
Tableau 61	<i>Sommaire des bilans de masses sur les solides et le P₁ pour l'essai en mode de fonctionnement continu à l'échelle pilote ; lisier d'engraisement ; polymère LPM 9511 ; TRH = 22 h</i>	173
Tableau 62	<i>Détails des paramètres d'opération des essais en mode de fonctionnement continu pour le flottateur de laboratoire et celui à l'échelle pilote</i>	174
Tableau 63	<i>Concentrations en solides, en nutriments, en DCO₁ et en coliformes fécaux des fractions liquides utilisées pour le suivi du filtre de tourbe</i>	176
Tableau 64	<i>Concentrations en solides, en nutriments, en DCO₁ et en coliformes fécaux des fractions liquides filtrées générées lors du suivi du filtre de tourbe</i>	177
Tableau 65	<i>Coefficients de variation des concentrations des fractions liquides utilisées lors du suivi du filtre de tourbe</i>	179
Tableau 66	<i>Coefficients de variation des concentrations des fractions liquides filtrées générées lors du suivi du filtre de tourbe</i>	180

Tableau 67	<i>Consommation (Cons._p) et coûts (Coûts_p) des polymères pour les essais en mode continu à l'échelle du laboratoire et à l'échelle pilote.....</i>	181
Tableau 68	<i>Montants des intérêts payés pour un emprunt de 85 000\$</i>	182
Tableau 69	<i>Flux monétaire des coûts annuels (1 000 \$·an⁻¹).....</i>	184
Tableau 70	<i>Variation des coûts pour le traitement du lisier en fonction du volume annuel de lisier produit et traité.....</i>	185
Tableau 71	<i>Variation des coûts pour le traitement du lisier en fonction du capital investi.....</i>	186
Tableau 72	<i>Variation des coûts pour le traitement du lisier en fonction du temps de main d'œuvre nécessaire.....</i>	186
Tableau 73	<i>Variation des coûts pour le traitement du lisier en fonction des coûts d'entretien.....</i>	186
Tableau 74	<i>Variation des coûts pour le traitement du lisier en fonction de la concentration de polymère ajoutée.....</i>	187

LISTE DES FIGURES

Figure 1	Répartitions des formes solubles et solides du phosphore et de l'azote.....	5
Figure 2	Position du procédé de traitement dans la chaîne de gestion du lisier.....	29
Figure 3	Schéma des principales constituantes du procédé de traitement à l'étude.....	30
Figure 4	Schéma d'un attelage floc-bulle.....	33
Figure 5	Schématisation d'une molécule de polyacrylamide.....	39
Figure 6	Schématisation d'une molécule de polymères cationiques.....	40
Figure 7	Vues en élévation et de dessus de la cellule de flottation utilisée au laboratoire.....	63
Figure 8	Vues en élévation et de dessous du séparateur à l'échelle pilote.....	66
Figure 9	Vue d'ensemble du montage à l'échelle pilote.....	66
Figure 10	Performances des polymères anioniques, neutres et cationiques en terme de séparation, de floculation et de surnageant pour les lisiers bruts.....	76
Figure 11	Qualité de la floculation pour des polymères cationiques en fonction des concentrations de poussière de sablage.....	78
Figure 12	Concentrations de NH_3 , de H_2S , de CO et de CO_2 mesurées lors d'un essai de flottation.....	89
Figure 13	Variations des solides et de la DCO _i du LB et de la FL en fonction du temps pour l'essai LABCO01 ; lisier de maternité ; TRH = 4,6 h.....	97
Figure 14	Variations des nutriments du LB et de la FL en fonction du temps pour l'essai LABCO01 ; lisier de maternité ; TRH = 4,6 h.....	98
Figure 15	Variations des solides et de la DCO _i du LB et de la FL en fonction du temps pour l'essai LABCO03 ; lisier de pouponnière ; TRH = 6,4 h.....	99
Figure 16	Variations des nutriments du LB et de la FL en fonction du temps pour l'essai LABCO03 ; lisier de pouponnière ; TRH = 6,4 h.....	100
Figure 17	Variations des solides et de la DCO _i du LB et de la FL en fonction du temps pour l'essai LABCO05 ; lisier d'engraissement ; TRH = 6,4 h.....	101
Figure 18	Variations des nutriments du LB et de la FL en fonction du temps pour l'essai LABCO05 ; lisier d'engraissement ; TRH = 6,4 h.....	102
Figure 19	Performances du filtre de tourbe pour les ST, les MES, la DCO _i et les CF en fonction du temps de fonctionnement.....	119
Figure 20	Performances du filtre de tourbe pour les nutriments en fonction du temps de fonctionnement.....	120
Figure 21	Variations des coûts pour le traitement du lisier de porc en fonction du volume annuel de lisier à traiter.....	124



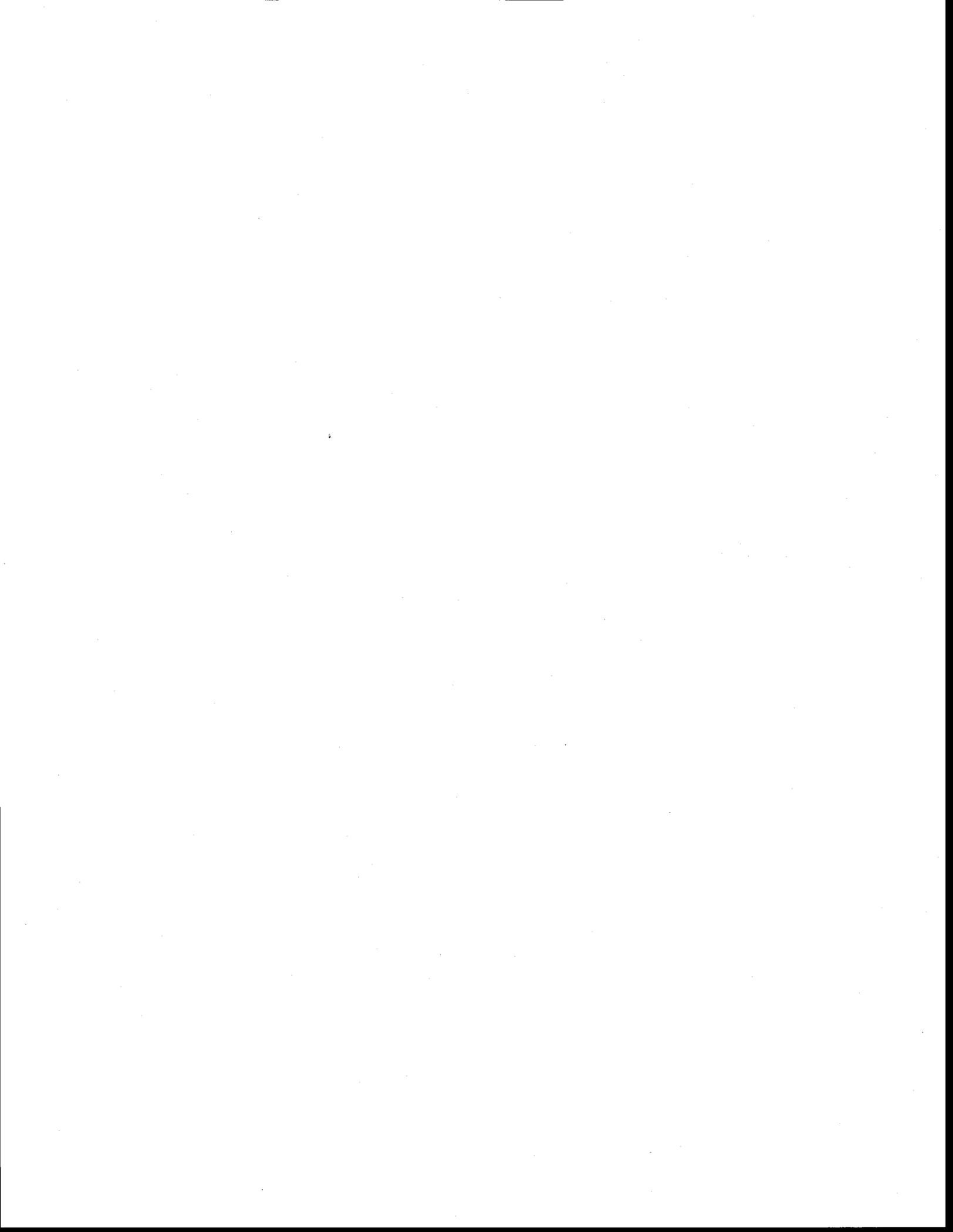
LISTE DES ÉQUATIONS

Équation 1	Vitesse ascensionnelle (V) d'un attelage floc-gaz.....	33
Équation 2	Formule de l'indice composé de la qualité de la flottation.....	84
Équation 3	Formule de l'indice composé de la mesure de la flottation.....	85
Équation 4	Deuxième loi de Newton appliquée à la sédimentation d'une particule.....	145
Équation 5	Deuxième loi de Newton simplifiée.....	146
Équation 6	Force gravitationnelle nette.....	146
Équation 7	Force de traînée.....	146
Équation 8	Vitesse de sédimentation d'une particule sphérique.....	146
Équation 9	Nombre de Reynolds.....	147
Équation 10	Coefficient de traînée corrigée par un facteur de sphéricité.....	148
Équation 11	Vitesse de sédimentation d'une particule sphérique simplifiée.....	148
Équation 12	Pourcentage d'enlèvement des nutriments et de la DCO _t	149
Équation 13	Coefficients de variance.....	159



LISTE DES ABRÉVIATIONS

APHA	American Public Health Association
ASTM	American Society for Testing and Materials
BR	Boues rouges
BRPS	Tests d'efficacité des boues rouges et de la poussière de sablage
C/N	Ratio «carbone/azote»
CF	Coliformes fécaux
CO	Carbone organique
COL	Tests de flottation en colonnes
CON	Tests de flottation en cônes
CPVQ	Conseil de productions végétales du Québec
DBO ₅	Demande biologique en oxygène
DCO _t	Demande chimique en oxygène totale
E _{ST}	Enlèvement des solides totaux
F	Floculation
FIL	Suivi des performances du filtre à base de tourbe
FL	Fraction liquide
FLF	Fraction liquide filtrée
FS	Fraction solide
GAZ	Étude des gaz dégagés lors de la flottation biologique
ICMF	Indice composé de la mesure de la flottation
ICQF	Indice composé de la qualité de la flottation
IRDA	Institut de recherche et de développement en agroenvironnement
LABCO	Essais de flottation en mode continu à l'échelle du laboratoire
LABCU	Essais de flottation en mode cuvée à l'échelle du laboratoire
LB	Lisier brut
LQE	Loi sur la qualité de l'environnement
MAPAQ	Ministère de l'agriculture, de la pêche et de l'alimentation du Québec
MES	Matières en suspension
NH ₄ ⁺	Azote ammoniacal
N-NH ₄ ⁺ /P _t	Ratio «azote ammoniacal/phosphore total»
N _{NTK}	Azote total Kjeldahl
PAEF	Plan agroenvironnemental de fertilisation
PAM	Polyacrylamide
PILCO	Essais de flottation en mode continu à l'échelle pilote
PILCU	Essais de flottation en mode cuvée à l'échelle pilote
PO	Tests de polymères
PO ₄ ³⁻	Ortho-phosphates
POR	Potentiel d'oxydoréduction
PS	Poussière de sablage
P _t	Phosphore total
S/L	Ratio «volume de solide/volume de liquide»
Se	Séparation
ST	Solides totaux
Su	Surnageant
TRH	Temps de rétention hydraulique



INTRODUCTION

Il est bien loin le temps bucolique où les producteurs agricoles, oeuvrant en mode autarcique, élevaient quelques porcs dans le cadre d'activités agricoles diversifiées en équilibre avec la nature environnante. Ce mode de production a maintenant fait place à la spécialisation et à la concentration de la production. D'ailleurs, les termes d'entreprises agricoles, de lois du marché et de globalisation de l'économie, de plus en plus employés quand il est question d'agriculture, témoignent des profondes transformations qu'a subies le monde agricole au cours des dernières décennies. Loin d'être ralentie, l'intensification de l'agriculture est amplifiée depuis 1998 en raison de l'objectif économique, adopté lors de la Conférence sur l'agriculture et l'agroalimentaire québécois, de doubler les exportations des produits agroalimentaires du Québec. L'industrie porcine n'y fait pas exception. Seconde en importance dans le secteur agricole québécois avec une production annuelle de près de 7 millions de porcs, elle génère environ 3,7 milliards de dollars canadiens en revenus (Fédération des producteurs de porcs du Québec (FPPQ), 2002) pour tous les intervenants opérant depuis la production jusqu'à la transformation.

Ces changements semblent porter fruit du point de vue économique, mais qu'en ait-il de l'environnement ? Force est de constater que les problèmes de pollution agricole, tant au niveau de l'eau, des sols que de l'air, se sont accentués depuis une vingtaine d'années. D'une part, l'accroissement et la concentration des productions porcines engendrent des problèmes de gestion des fumiers et lisiers. Les surplus de déjections animales causent des difficultés au niveau de l'entreposage et de l'épandage. Les pratiques culturales, peu respectueuses à l'égard de l'environnement, majorent les problèmes liés à l'épandage. D'autre part, les problèmes d'odeur et de contamination des eaux souterraines et de surface (pathogènes responsables de maladies entériques, enrichissement en nutriments) affectent de plus en plus la qualité de vie et la santé des populations rurales. Bref, la pollution agricole a pris une telle ampleur qu'elle constitue, aux dires du ministère de l'Environnement, le type de pollution le plus préoccupant au Québec.

La loi régissant l'aspect environnemental en milieu agricole est la *Loi sur la qualité de l'environnement* (LQE) dont une série d'articles sont mis en application dans le cadre du *Règlement sur la réduction de la pollution d'origine agricole* (C. Q-2, R.18.2). Les champs d'application de ce règlement couvrent plusieurs types d'élevages d'animaux dont les suidés. Le règlement vise à protéger l'eau et le sol contre la pollution causée par certaines activités agricoles, par les installations d'élevage ainsi que par les ouvrages d'entreposage. L'épandage des lisiers à la ferme et la gestion des surplus sont régis, entre autres, par le plan agroenvironnemental de fertilisation (PAEF) institué par ce règlement.

Bien que les surplus de lisiers causent d'importants problèmes environnementaux, il appert que le lisier, engrais organo-minéral naturel, surpasse les engrais minéraux quant à ses qualités fertilisantes à court et à long terme (Côté *et al.*, 1996). De plus, au début des années 90, la valeur monétaire du lisier de porc s'élevait à près de 45,5 millions de dollars canadiens (en fonction du prix moyen des engrais minéraux de 1991) (Lemelin *et al.*, 1992). Il apparaît donc que les surplus de lisier de porc présentent des avantages agricoles et économiques non négligeables.

Est-il possible de diminuer la charge polluante des surplus de lisiers tout en bénéficiant de leurs valeurs fertilisante et économique ? Bien sûr, et la voie technologique peut fournir des solutions fort intéressantes. Le projet de recherche en cours vise à démontrer le potentiel d'une technologie de traitement du lisier porcin qui préserverait les qualités agronomiques du lisier tout en prévenant les inconvénients environnementaux liés à ce dernier.

Afin de démontrer clairement le potentiel de la nouvelle technologie de traitement, but premier de ce mémoire, il importe de passer en revue la littérature traitant du lisier de porc et de sa gestion. Par la suite, la démarche méthodologique, véritable concrétisation des objectifs spécifiques de la recherche, est élaborée. Elle mène à la présentation des résultats et de la discussion qui trouvent leur aboutissement dans une brève conclusion.

1. REVUE DE LITTÉRATURE

La revue de littérature permettra dans un premier temps de définir et de caractériser le lisier de porc. Ensuite, les formes de gestion du lisier seront détaillées en préambule à la présentation de la problématique de la gestion du lisier. De la problématique découle l'énoncé des stratégies environnementales de gestion du lisier qui mène à la présentation des solutions technologiques existantes et commercialisables. Ceci mettra en perspective la technologie de traitement du lisier de porc par flottation biologique, sujet de ce mémoire. Les principes théoriques soutenant le développement de cette dernière seront par la suite posés. Ce développement est évidemment assujéti aux attentes de l'industrie porcine qui seront énumérées. Enfin, l'exposé du but et des objectifs de la présente recherche constituera le point final de ce chapitre.

1.1 Définition et types de lisier de porc

Le lisier de porc est essentiellement un mélange de fèces (55 à 60 %) et d'urines (40 à 45 %) (Les Consultants BPR, 1994). À ce mélange initial s'ajoutent les eaux de lavage, les pertes des systèmes d'approvisionnement en eau, les résidus alimentaires et de litières, les soies ainsi que des objets tels les seringues ou les médaillons d'oreille.

Le lisier de porc est loin d'être un rejet homogène. Plusieurs facteurs en influencent les caractéristiques. Il y a d'abord les facteurs intrinsèques aux porcs tels l'espèce et l'âge. D'autres éléments, reliés davantage au mode d'élevage, ont également des répercussions sur les qualités du lisier dont les modes de distribution de l'eau et des aliments, la diète de même que les modes d'évacuation des déjections porcines.

Bien qu'il soit encore possible de voir des élevages traditionnels opérant de la gestation à la finition, la tendance est à la spécialisation des élevages en fonction des différentes étapes de la production que sont la maternité, la pouponnière et l'engraissement. À la lumière des facteurs exposés ci-haut, il résulte que les lisiers provenant des élevages spécialisés diffèrent les uns des autres d'où la volonté dans cette recherche de procéder à l'étude séparée de

ceux-ci. Trois types de lisiers ont donc été retenus soit les lisiers de maternité, de pouponnière et d'engraissement. Le tableau qui suit présente des informations sur la composition générale des élevages (Ministère de l'agriculture, de la pêche et de l'alimentation du Québec (MAPAQ), 1999), sur le nombre de têtes produites pour chaque mode d'élevage à l'échelle du Québec (Drolet et Gilbert, 2000) et sur le volume de lisier produit par porc¹ (MAPAQ, 1999).

Tableau 1 Informations générales sur les lisiers de maternité, de pouponnière et d'engraissement au Québec

	Composition générale des élevages	Nombre de têtes	Volume produit ^a (l·j ⁻¹ ·porc ⁻¹)
Maternité	Truies, verrats et porcelets	1 001 143	17,0
Pouponnière	Porcelets (environ de 5 à 30 kg)	371 324	1,8
Engraissement	Porcs (environ 15 à 107 kg)	1 745 717	7,4

^a Les volumes pour les lisiers de pouponnière et d'engraissement sont des moyennes calculées à partir des données du document du MAPAQ.

En terme de volume de lisier produit par chaque type d'élevage, il ressort que le lisier de maternité constitue environ 56 % du lisier généré alors que les lisiers de pouponnière et d'engraissement représentent respectivement 2 % et 42 %.

1.2 Composantes du lisier de porc

La composition physico-chimique du lisier de porc, tout type confondu, évolue tout le long de la chaîne de gestion des excréments animaux. Cette chaîne comprend généralement la

¹ Noter que les volumes produits incluent les déjections produites, les pertes d'eau normales des équipements (sans système de réduction des pertes d'eau), les eaux de lavage, les rebus d'alimentation et un facteur de sécurité. Ils excluent les eaux de précipitation.

production de lisier, l'entreposage en pré-fosse (courte durée), l'emmagasinement en fosse (longue durée), la reprise et l'épandage. Les nombreuses manipulations, le temps et les conditions de stockage influent sur les mécanismes biologiques, physiques et chimiques qui entraînent, entre autres, des variations au niveau des concentrations d'éléments nutritifs tels le phosphore et l'azote. En plus des éléments nutritifs, le lisier contient des matières organiques, des microorganismes et des métaux lourds.

1.2.1 Éléments nutritifs

Bien que le lisier de porc contienne du potassium, seul le phosphore et l'azote retiennent l'attention dans la présente recherche. Le phosphore vient des aliments, des cellules de l'épiderme et des microorganismes (Theobald, 1992). L'azote provient essentiellement de l'urée issue du métabolisme du porc ainsi que des protéines et des acides aminés trouvés dans les aliments et les microorganismes (Nitchou, 1997).

Ces éléments nutritifs se retrouvent sous des formes solubles et solides. La figure 1, tirée de Coillard (1990), illustre bien les diverses répartitions du phosphore et de l'azote.

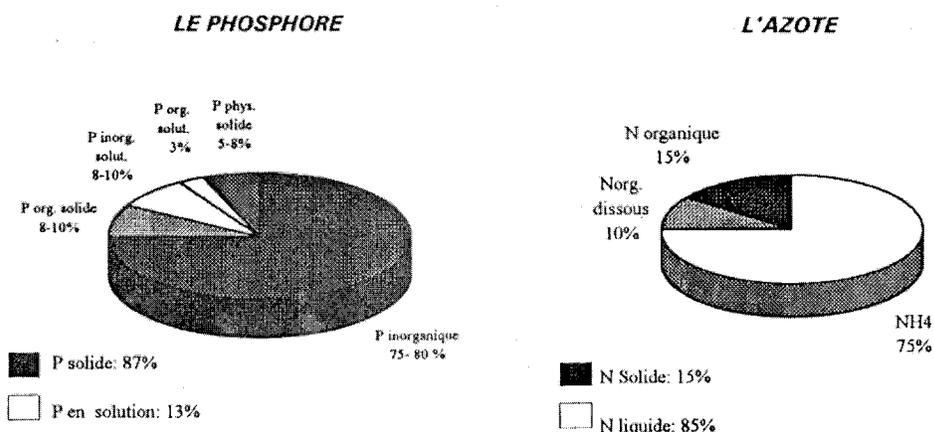


Figure 1 Répartitions des formes solubles et solides du phosphore et de l'azote

Environ 87 % du phosphore est sous forme solide alors que le reste, 13 %, se présente sous forme soluble (Coillard, 1990). Quant à l'azote, la forme solide équivaut à environ 15 % et la forme soluble s'élève à près de 85 % (Coillard, 1990).

1.2.2 Matières organiques

Le lisier présente une charge organique cent fois plus élevée comparativement aux eaux usées domestiques (Dutil *et al.*, 1994). Les matières organiques tirent leur origine des parties indigestibles des aliments, de la perte directe d'aliments de même que des cellules bactériennes (Theobald, 1992). Elles peuvent être solubles ou non.

1.2.3 Microorganismes

Partant du fait que le lisier entreposé constitue un milieu anaérobie (Spoelstra, 1978), la flore microbienne est essentiellement de nature anaérobie ou anaérobie facultative. Une étude de Bisailon *et al.* (1984) a même démontré que la quantité de microorganismes anaérobies était semblable tant à la surface du lisier qu'à une profondeur de deux mètres dans des fosses extérieures de trois à quatre mètres de profond. De surcroît, cette même étude a permis d'observer le dégagement de gaz à la surface du lisier prouvant ainsi l'efficacité de l'activité métabolique des organismes anaérobies dans ce milieu en aérobiose. *Streptococcus*, *Peptostreptococcus*, *Eubacterium*, *Lactobacillus*, *Escherichia*, *Clostridium*, *Propionibacterium*, *Bacteroides* et *Megasphaera* totalisent les principaux groupes bactériens qui sont retrouvés dans le lisier (Zhu et Jacobson, 1999). Il importe de noter que certains antibiotiques, incorporés dans les rations alimentaires pour prévenir les infections et favoriser la croissance, peuvent inhiber les activités bactériennes lors de la digestion anaérobie du lisier de porc à des températures inférieures à 20°C (Massé *et al.*, 2000a).

1.2.4 Métaux lourds

L'ajout de compléments minéraux dans l'alimentation des porcs explique la présence de métaux lourds comme le cuivre et le zinc dans le lisier (Lavoie *et al.*, 1994). Le cuivre favorise la croissance alors que le zinc est utilisé comme fongicide dans la moulée (Lavoie *et al.*, 1994).

1.2.5 Inventaire des caractéristiques du lisier de porc

Le tableau 2 qui suit expose les principales caractéristiques des lisiers de porc généralement retrouvés au Québec (Aquatech Société de gestion de l'eau, 1984; Bisailon *et al.*, 1984 ; 1985 ; Centre de recherche industrielle du Québec (CRIQ), 1994 ; Entry et Sojka, 2000 ; Roche Groupe Conseil, 1984 ; Tran *et al.*, 1996). Les données propres à chaque type de lisier répertoriées dans la littérature sont trop fragmentaires pour être présentées ou quasi inexistantes.

Tableau 2 Caractéristiques physiques, chimiques et biologiques du lisier de porc

Paramètres	Minimums	Maximums
PH	6,7	8,0
POR (mV)	-100	-150
ST (%)	3,8	7,4
MES (g·l ⁻¹)	20,4	47,9
N _{NTK} (g N·l ⁻¹)	2,5	13,8
P _t (g P·l ⁻¹)	0,1	2,4
DCO _t (g·l ⁻¹)	12,4	80,0
Cu (mg Cu·kg ⁻¹ B.S.)	200	400
Zn (mg Zn·kg ⁻¹ B.S.)	1 012	1 570
Coliformes fécaux (UFC·100 ml ⁻¹)	4,5E+04	1,1E+08

Quelques précisions relatives aux paramètres s'imposent. Le pH correspond à la concentration en ions hydrogènes d'un effluent interprétée toujours en fonction de l'échelle suivante : acide, neutre ou basique. Le potentiel d'oxydoréduction (POR) est un indice des conditions oxydantes (valeur positive) ou réductrices (valeur négative) prévalant dans un milieu.

Les matières solides du lisier sont caractérisées par les solides totaux (ST) et les matières en suspension (MES). La différence entre les ST et les MES représente les matières dissoutes du lisier. Noter que pour les solides totaux, 1 % ST équivaut à $10 \text{ g}\cdot\text{l}^{-1}$.

Quant aux éléments nutritifs, il y a des mesures d'azote total (N_{NTK}) et de phosphore total (P_t) qui incluent à la fois les formes solubles et solides. Les mesures de l'ammonium (NH_4^+) et des phosphates (PO_4^{3-}) représentent essentiellement les formes dissoutes majeures associées à l'azote et au phosphore dans le lisier.

Les matières organiques sont évaluées grâce à la mesure de la demande chimique en oxygène (DCO_t) assimilée à l'ensemble des matières organiques biodégradables ou non.

L'évaluation des coliformes fécaux (CF), utilisés comme indicateur de pollution pour l'eau de consommation, fournit des informations relatives au potentiel polluant du lisier en terme bactériologique.

1.3 Types de gestion des rejets de lisier

La gestion du lisier rejeté s'inscrit dans toute la série d'étapes que sont la production de lisier, l'entreposage (pré-fosse, fosse), la reprise et la disposition par épandage. La gestion sous forme liquide constitue le type de gestion standard dans le milieu de la production porcine. Depuis quelques décennies, la recherche a fait poindre de nouvelles technologies qui ont favorisé le développement de la gestion sous forme solide-liquide et sous forme solide.

1.3.1 Gestion sous forme liquide

Dans le contexte québécois, la gestion sous forme liquide consiste à récupérer les déjections dans une rigole sous-jacente à un plancher semi-latté. Les rigoles sont vidangées par gravité grâce à un nettoyage avec de l'eau. Le lisier est évacué par pompage vers la pré-fosse puis vers la fosse extérieure sans toiture. Le lisier est entreposé ainsi jusqu'à l'épandage (Les Consultants BPR, 1994).

De toutes les formes de gestion des déjections, la gestion sous forme liquide est la plus populaire (Lavoie *et al.*, 1994) en raison de sa facilité à être mécanisée (Gingras *et al.*, 1998), de ses faibles coûts initiaux, de la réduction d'odeurs dans les bâtiments et des économies d'énergie (Jones *et al.*, 1982).

Des considérations environnementales rappellent toutefois que la gestion liquide nécessite des volumes d'eau importants. Cet inconvénient est majoré lorsque l'eau de lavage provient d'un système d'approvisionnement en eau potable. Il existe cependant des systèmes de recyclage du surnageant dans les fermes où le lisier est traité (Chynoweth *et al.*, 1999). La dilution du lisier constitue un autre désavantage de taille. Elle fait en sorte qu'il faille disposer de fosses de grandes capacités, que les volumes manutentionnés lors de l'épandage soient faramineux et que la valeur fertilisante du lisier soit variable. De plus, il y a des risques de bris mécaniques, des possibilités de transmissions de maladies et des besoins de ventilation supplémentaires (Jones *et al.*, 1982).

1.3.2 Gestion sous forme solide-liquide

L'idée de la gestion sous forme solide-liquide a émergé avec le développement de technologies de traitement du lisier de porc. Les buts recherchés sont de faciliter la manutention des phases solide et liquide, de réduire les volumes à gérer et à épandre, de bonifier les valeurs fertilisantes de chacune des phases et de pallier les problèmes d'odeurs.

Ce type de gestion fait appel à une panoplie de possibilités dont la séparation naturelle, la séparation mécanisée (tamis, presseur rotatif, centrifugeuse, toiles filtrantes) ou la séparation par gravité avec ajout ou non d'agents de conditionnement. Ces différentes technologies seront approfondies subséquemment.

1.3.3 Gestion sous forme solide

Au sens de la loi, la gestion sur fumier solide représente le mode d'évacuation d'un bâtiment d'élevage ou d'un ouvrage d'entreposage des déjections animales à l'état solide dans lesquelles les liquides ont été absorbés par les matières solides à la suite de l'utilisation d'une quantité suffisante de litière permettant d'abaisser la teneur en eau contenue dans ces déjections à une valeur inférieure à 85 % (c. Q-2, r.18.2).

Au niveau pratique, une des formes que prend actuellement la gestion sous forme solide est l'élevage sur litière. Ce dernier permet le compostage des déjections directement dans le bâtiment grâce à l'utilisation de la litière et du contrôle de l'environnement intérieur. Cette forme de gestion facilite la manipulation des déjections. Elle réduit les volumes à gérer tout en conservant les qualités fertilisantes. Elle atténue aussi les problèmes d'odeur. Toutefois, elle produit des gaz à effet de serre et des gaz générateurs de pluies acides et elle favorise la présence de moisissures et de certaines bactéries dans l'air (Les Consultants BPR, 1994).

1.4 Problématique de la gestion des rejets de lisier

La problématique relative à la gestion des rejets de lisier réside au niveau des surplus de lisier de porc. Un surplus de lisier existe dès que les volumes produits, riches en nutriments, excèdent les besoins en fertilisants des surfaces d'épandage d'une ferme. Le mode de gestion sous forme liquide jumelé au mode d'élevage intensif génère des quantités de lisier fort volumineuses. Si plusieurs fermes en surplus de lisier sont concentrées sur un même territoire, la problématique de la gestion des surplus est fortement majorée puisqu'elle s'étend au niveau régional. Dès lors, le surplus de lisier de porc est considéré davantage comme un déchet (Lavoie *et al.*, 1994) puisqu'il est difficile, voir impossible, d'en disposer sans porter préjudice à l'environnement. Les problèmes environnementaux liés aux surplus de lisier de porc, et surtout à leur disposition, touchent à la fois les eaux souterraines et de surface, l'air, les sols, les forêts et les milieux humides.

1.4.1 Contamination des eaux

Quand il est question de contamination hydrique, deux formes de pollution entrent en jeu : la pollution ponctuelle et la pollution diffuse. La différence résulte du mode d'émission. La première provient de sources bien définies tels des déversements accidentels ou volontaires. L'effluent polluant y est concentré. La seconde vient de grandes surfaces où l'élément polluant est plus dispersé.

Actuellement, la pollution diffuse d'origine agricole, fortement reliée à l'épandage des surplus de lisier sur les sols agricoles, est très préoccupante dans les régions où se concentrent les élevages intensifs (Gangbazo *et al.*, 1999). Elle est contrôlée par la capacité inhérente des sols à retenir les éléments fertilisants potentiellement polluants et par la capacité d'assimilation des cultures (Lavoie *et al.*, 1994). Le choix de la technique d'épandage et les périodes d'épandage jouent également un rôle notoire dans l'intensité de la pollution diffuse (Gingras *et al.*, 1998).

L'interdépendance des eaux de surface et souterraines fait en sorte que les mécanismes de transport des polluants issus de l'épandage des lisiers sont interreliés. Il est possible de distinguer quatre voies hydrologiques de transport : ruissellement vers les rivières ou les lacs, percolation verticale à travers la zone non-saturée jusqu'à la nappe phréatique, mouvement latéral à travers la nappe phréatique vers les eaux de surface, reprise par les drains agricoles souterrains vers les eaux de surface (Banton *et al.*, 1994). Le climat, les propriétés du sol, la géologie du site, les pratiques agricoles et les autres formes d'utilisation du territoire influencent les quantités de polluants transportés (Banton *et al.*, 1994).

1.4.1.1 Eaux de surface

La pollution des eaux de surface est causée principalement par l'érosion et le ruissellement. Le phosphore soluble et les matières en suspension (matière organique et particules fines enrichies) constituent les matières polluantes majeures (Lavoie *et al.*, 1994). L'accumulation du phosphore dans le sol, engendrée par l'épandage répété d'importantes quantités d'engrais de ferme, peut accélérer les pertes de phosphore vers les rivières (Simard

et al., 1995 ; Giroux *et al.*, 1996). D'ailleurs, une étude s'échelonnant de 1979 à 1994 a démontré que le phosphore total est l'élément excédentaire qui affecte le plus l'indice de qualité de l'eau dans les régions agricoles (Painchaud, 1997). Le phosphore ainsi acheminé aux eaux de surface favorise l'eutrophisation des cours d'eau puisqu'il est souvent le facteur limitant de l'eutrophisation des rivières au Québec, en présence d'excès d'azote (Gangbazo *et al.*, 1999).

Le potentiel de contamination des eaux de surface par des microorganismes pathogènes existe puisque ces derniers peuvent survivre quelques jours après l'épandage (Donham, 2000). Cet auteur fait également remarquer que la vie des microorganismes est écourtée par de faibles températures, un petit taux d'humidité dans les sols, un bas pH, les rayons du soleil et la compétition avec d'autres organismes.

1.4.1.2 Eaux souterraines

Le lessivage des nitrates, forme très soluble et très mobile de l'azote, représente la principale cause de pollution des eaux souterraines par les épandages de lisier (Lavoie *et al.*, 1994). Les nitrates, en concentrations importantes, sont néfastes pour la santé humaine et animale (Chynoweth *et al.*, 1999).

Il existe également des possibilités que le phosphore soit lessivé vers les eaux souterraines malgré le fait que ce dernier ait de grandes affinités avec les particules de sol (Lavoie *et al.*, 1994). Ce phénomène semble amplifié par l'accumulation du phosphore qui affecte la capacité fixatrice de phosphore du sol. En effet, Simard *et al.* (1993) ont montré qu'il y a accroissement du phosphore soluble au niveau des horizons C du sol lorsque la capacité d'adsorption des sols en phosphore est dépassée. Noter que les horizons C sont les couches de sol qui abritent généralement les drains agricoles (Simard *et al.*, 1993). Étant donné que ces drains s'écoulent vers les cours d'eau, le lessivage du phosphore risque de contribuer au phénomène d'eutrophisation.

Le risque de contamination des eaux souterraines par des microorganismes pathogènes est similaire à celui des eaux de surface étant donné l'interrelation entre ces deux entités.

1.4.2 Pollution de l'air

Les informations contenues dans le présent paragraphe proviennent, à moins d'indications contraires, du document écrit par Donham (2000). Le lisier de porc génère des polluants aériens à l'intérieur des bâtiments d'élevage, à l'entreposage et au moment de la reprise et de l'épandage. Les formes que peuvent prendre ces polluants sont gazeuses ou solides. Parmi les gaz, les principaux sont l'ammoniac (NH_3), le dioxyde de carbone (CO_2), le méthane (CH_4) et le sulfure d'hydrogène (H_2S). Les polluants solides sont essentiellement la poussière provenant des porcs et de la nourriture. Il y a également des moisissures, des bactéries et des champignons.

Quelle est l'évolution de ces polluants au cours du cheminement du lisier depuis les bâtiments jusqu'à l'épandage ? L'intérieur des bâtiments constitue un espace clos et généralement ventilé où se concentrent les gaz, la poussière de même que les microorganismes cités antérieurement. L'entreposage du lisier se fait très souvent dans des conditions telles qu'il favorise la digestion anaérobie des composés organiques contenus dans ce dernier favorisant ainsi l'émission des gaz principaux. D'autres composés volatils se retrouvent à l'état de traces. Certains de ces composés sont à l'origine de l'odeur typique du lisier tels les mercaptans, les acides gras volatiles, les phénols et les indoles (Svoboda et Jones, 1999).

Lors de la reprise du lisier et de l'épandage, ces émissions gazeuses sont majorées en raison du brassage occasionné.

Les problèmes environnementaux engendrés par la pollution aérienne issue de lisier sont très variés. D'abord, les émissions azotées tels l'ammoniac et, dans une moindre mesure, les oxydes nitreux (issus d'une dénitrification partielle) contribuent à l'effet de serre tout comme le dioxyde de carbone et le méthane. Noter que les oxydes nitreux nuisent à la couche d'ozone (Burton, 1992). De surcroît, l'ammoniac vaporisé peut enrichir en azote les étendues d'eau et les écosystèmes naturels. Il ne faut pas non plus oublier que des aérosols d'ammonium, provenant de réactions entre l'ammoniac et les acides déjà présents dans l'air

(acides chlorhydrique, sulfurique ou nitreux), se retrouvent dans les précipitations qui causent l'acidification des sols et de l'eau (ApSimon et Kruse-Plass, 1991).

Il existe également des problèmes liés aux fortes odeurs autour des bâtiments et lors de l'épandage. Ces odeurs surpassent maintenant le stade de simple nuisance puisque des effets négatifs sur la santé humaine sont de plus en plus reconnus. Les impacts sur la santé humaine des travailleurs agricoles, confinés à l'intérieur des infrastructures d'élevages, sont bien connus (Gordon et Rhodes, 1993 ; Mahon et Jackson, 1995), mais les impacts ne sont plus limités à ce niveau. Schiffman *et al.* (1995) ont trouvé que les gens vivant près de grandes entreprises d'élevages sont plus colériques, confus, tendus, dépressifs et fatigués par rapport aux personnes habitant hors de la zone d'élevage. Il est donc peu étonnant que des difficultés de cohabitation surgissent en milieu agricole d'autant plus que la population rurale change. Les agglomérations urbaines prennent de l'expansion vers les zones rurales accroissant ainsi le nombre de résidants non producteurs agricoles (Bailey *et al.*, 1998).

1.4.3 Dégradation des sols agricoles

La dégradation des sols agricoles se traduit par une diminution de la capacité des sols à produire. Sans entrer dans les détails, il importe de citer quelques exemples liés à l'épandage des surplus de lisier. D'abord, le cuivre accumulé dans le sol à la suite de l'application de fortes doses de lisier peut s'avérer toxique pour les végétaux (Lalonde, Girouard, Letendre et Ass., 1990). De surcroît, l'excès d'un ou de plusieurs éléments nécessaires à la croissance des plantes peut entraîner des diminutions de rendement des cultures (Lavoie *et al.*, 1994). Par exemple, un surplus de phosphore soluble limite l'absorption du potassium, du zinc, du fer et du cuivre (Doucet, 1992).

1.4.4 Déforestation et assèchement de milieux humides

Certaines pratiques en milieu agricole s'avèrent nuisibles pour l'environnement. En effet, la nécessité de disposer des surplus de lisier de porc jumelée au manque de superficies d'épandages poussent les producteurs à déboiser les dernières zones forestières de certaines régions agricoles et à assécher des milieux humides (Francoeur, 2001).

1.5 Stratégies environnementales de gestion du lisier

Les stratégies environnementales de gestion des surplus de lisier passent par des voies légales, économiques et technologiques. Les solutions technologiques représentent l'intérêt de ce travail. Les innovations techniques ouvrent la porte au traitement du lisier porcin afin de solutionner les problèmes environnementaux. Toutefois, le traitement du lisier de porc est-il requis dans toutes les situations ? Et, s'il s'avère nécessaire, quelle forme peut-il emprunter ? L'analyse des mesures préalables à l'implantation d'un traitement et des traitements du lisier porcin à mettre en place fournira plusieurs éléments de réponses.

1.5.1 Mesures préalables à l'implantation d'un traitement du lisier de porc

Les contraintes économiques et organisationnelles liées à la mise en place de nouvelles technologies de traitement amènent les entreprises porcines à améliorer dans un premier temps la gestion standard du lisier, soit la gestion sous forme liquide. Ces améliorations se concrétisent par l'application de mesures d'atténuation de la charge fertilisante, du volume et des odeurs du lisier de porc. Quelques exemples sont présentés dans les sections qui suivent.

1.5.1.1 Diminution de la charge en éléments fertilisants du lisier

La réduction de la charge en nutriments du lisier passe par des modifications au niveau de la régie alimentaire, de la régie du troupeau, de la génétique, des performances zootechniques et du contrôle d'ambiance dans les porcheries (Gingras *et al.*, 1998).

Gingras *et al.* (1998) suggèrent comme exemple une augmentation du nombre de rations alimentaires optimisées par des enzymes ou des acides aminés synthétiques pour diminuer de 30 % les rejets individuels d'azote et de phosphore.

Une autre alternative consisterait à profiter de la sédimentation naturelle du lisier contenu dans les fosses. Il est ainsi possible d'obtenir un surnageant épuré par rapport à la fraction décantée plus riche en éléments fertilisants. Il est avancé qu'un maximum de 70 % de phosphore et de 35 % d'azote peuvent être extraits du lisier puisque le phosphore, et dans

une moindre mesure l'azote, sont liés davantage aux particules solides qui peuvent décanter (Gingras *et al.*, 1998).

1.5.1.2 Diminution du volume de lisier produit

Une façon de diminuer les volumes de lisier produit est l'utilisation de systèmes d'abreuvoirs et de distribution alimentaire économiseurs d'eau (Gingras *et al.*, 1998). À cet effet, une étude révèle que l'utilisation de trémies-abreuvoirs a permis de réduire de 34 % le volume de lisier à entreposer et à disposer et ce, en comparaison avec les fermes équipées de tétines qui correspondaient à la pratique conventionnelle des dernières années (Cournoyer *et al.*, 1998). Noter que les masses d'azote et de phosphore contenues dans le lisier demeurent inchangées.

Autre moyen de réduire le volume de lisier : la construction de toitures sur les réservoirs extérieures. Les toitures empêchent la dilution du lisier par les eaux de précipitation limitant ainsi l'augmentation du volume à épandre. Outre cet avantage majeur, elles contribuent à la conservation de l'azote et au confinement des odeurs (Gingras *et al.*, 1998). Par contre, il semble qu'elles ralentissent la fonte de la glace au printemps (Gingras *et al.*, 1998).

1.5.1.3 Atténuation des odeurs

Les problèmes d'odeurs se divisent généralement en deux catégories : odeurs aux bâtiments et à l'entreposage et odeurs à l'épandage. Une panoplie de moyens permettent de réduire les odeurs au niveau des infrastructures. Un rapport (Gingras *et al.*, 1998) en propose quelques-uns dont la diminution des surfaces de planchers humides dans les porcheries, la réduction de la surface de lisier dans les rigoles et la réduction de la vitesse de l'air près des surfaces.

Quant à l'amointrissement des odeurs à l'épandage, il est envisageable d'utiliser entre autres des rampes d'épandage avec pendillards et des rampes avec incorporation superficielle (Gingras *et al.*, 1998).

1.5.2 Traitement du lisier porcin à planter

Lorsque les mesures d'amélioration de la gestion sous forme liquide ne suffisent plus à résoudre les problèmes environnementaux, il devient impératif de modifier, totalement ou partiellement, le type de gestion par l'implantation d'une technologie de traitement.

Le traitement du lisier porcin accroît d'une part le taux d'acceptabilité² du lisier afin d'exploiter une plus grande superficie d'épandage (Les Consultants BPR, 1994). Il facilite d'autre part l'exportation du lisier hors de la zone de surplus lorsque aucune superficie d'épandage supplémentaire n'est disponible malgré une hausse du taux d'acceptabilité du lisier. Une des façons d'augmenter le taux d'acceptabilité et le potentiel d'exportation du lisier de porc est d'opter pour la gestion sous forme solide-liquide en concentrant les éléments fertilisants dans une fraction solide à haute valeur ajoutée et en épurant la fraction liquide. L'autre alternative est essentiellement la gestion sous forme solide décrite antérieurement.

Les traitements de lisier porcin se présentent sous deux formes : le traitement à la ferme et le traitement centralisé. Le champ d'action du traitement à la ferme se limite à l'échelle de l'entreprise porcine alors que le traitement centralisé opère à l'échelle régionale. La combinaison des deux formes de traitement est également envisageable.

Les traitements de lisier de porc sont qualifiés de complets lorsque la fraction liquide peut être rejetée directement dans un cours d'eau et que les sous produits sont directement utilisables comme fertilisants, amendements ou autres (Gingras *et al.*, 1998). La dérogation à au moins un de ces critères fait sorte que le traitement est partiel.

² Le taux d'acceptabilité correspond, pour un moment donné, au rapport entre la superficie des terres où du lisier serait accepté par rapport à la superficie totale des terres qui pourraient théoriquement en recevoir (Dutil *et al.*, 1994).

1.6 Technologies de traitement existantes

L'analyse des stratégies environnementales de gestion des surplus de lisier a fait ressortir la possibilité d'opter soit pour le traitement à la ferme, le traitement centralisé ou l'association des deux. Il importe maintenant de s'attarder aux aspects techniques liés à ces traitements. Il faut savoir que la plupart des technologies sont déjà utilisées pour le traitement des eaux usées domestiques ou industrielles et qu'elles sont maintenant sujettes à l'étude pour le lisier de porc. Certaines sont en voie de commercialisation, mais la plupart sont encore au stade de la recherche et du développement. La section qui suit présente donc une description générale des technologies. Les technologies sont classées selon la nature des procédés qui peuvent être mécaniques, biologiques, chimiques, thermiques ou physico-chimiques (Gingras *et al.*, 1998). Les sections traitant de chaque classe de procédés se terminent par la présentation d'un tableau synthèse détaillant les avantages et les inconvénients associés aux différents procédés abordés. La conclusion de la section passe par la présentation d'un tableau synthèse répertoriant les technologies commercialisables et leurs caractéristiques.

1.6.1 Procédés mécaniques

1.6.1.1 Séparation mécanique

Les techniques mécaniques de séparation comprennent les tamis, les presses, les centrifugeuses et les toiles filtrantes (Les Consultants BPR, 1994). Le principe général est de retenir les particules solides du lisier à l'aide d'un tamis ou d'une toile et de recueillir ainsi une fraction solide. La différence entre les procédés se situe au niveau de l'application ou non d'une pression sur la fraction solide pour en faire sortir le liquide (Jaulin et Bernard, 1993). Les tamis et les toiles filtrantes n'exercent aucune pression contrairement aux presses et aux centrifugeuses.

1.6.1.2 Filtration

La séparation mécanique des matières solides du lisier à l'aide de membranes constitue le principe sous-jacent à la filtration. Les types de filtration sont classés en fonction de la taille

des particules retenues : osmose (1 à 10 Angström), ultrafiltration (10 à 1 000 Angström), nanofiltration et microfiltration (1 000 à 100 000 Angström) (Gingras *et al.*, 1998).

Les avantages et les inconvénients des procédés mécaniques sont présentés au tableau 3.

Tableau 3 Avantages et inconvénients des procédés mécaniques

Séparation mécanique	
<u>Avantages :</u>	
<ul style="list-style-type: none"> • Réduction du volume d'entreposage ; • Homogénéité de la fraction liquide ; • Facilité accrue de pompage ; • Diminution des risques de blocage de la tuyauterie (Svoboda et Jones, 1999). 	
<u>Inconvénients :</u>	
<ul style="list-style-type: none"> • Difficulté à séparer les colloïdes auxquels sont associés des nutriments organiques (Hill et Tollner, 1980). 	
Filtration	
<u>Avantages :</u>	
<ul style="list-style-type: none"> • Haute performance d'extraction de l'azote, du phosphore et du potassium (Gingras <i>et al.</i>, 1998). 	
<u>Inconvénients :</u>	
<ul style="list-style-type: none"> • Faible performance des membranes pour les liquides chargés en matières organiques (nécessité d'une séparation mécanique préalable à la filtration) ; • Problèmes de colmatage (Gingras <i>et al.</i>, 1998). 	

1.6.2 Procédés biologiques

1.6.2.1 Traitement aérobie

Le traitement aérobie implique le développement d'une flore microbienne aérobie qui oxydera la matière organique contenue dans le lisier. L'activité des microorganismes aérobies est stimulée de façon optimale grâce à un apport en oxygène fourni par des systèmes d'aération. Les systèmes biologiques aérobies étudiés pour le traitement du lisier

sont les boues activées, le lagunage aéré, les lits bactériens et l'aération séquentielle (arrêt périodique de l'aération pour créer des conditions anoxiques) (Theobald, 1992).

1.6.2.2 Traitement anaérobie

Le traitement anaérobie de la matière organique est uniquement possible en l'absence d'oxygène libre. La flore microbienne active diffère selon les deux phases caractéristiques des traitements anaérobies, soit l'acidogénèse et la méthanogénèse. Il y a tout d'abord une production d'acides gras volatils d'où le terme acidogénèse. Ces acides gras volatils sont ensuite transformés en gaz sous forme de méthane (70 %) et de dioxyde de carbone (30 %), au cours de la méthanogénèse (Blais et Tyagi, 2000). Le fort contenu en protéines du lisier de porc mène aussi à la production de gaz tels le sulfure d'hydrogène et l'ammoniac (Chynoweth *et al.*, 1999 ; Theobald, 1992). Il n'est pas rare d'observer le début de l'acidogénèse lors de l'entreposage du lisier de porc (Chynoweth et Pullammanappallil, 1996). En effet, les bactéries acidogènes ont une croissance plus rapide que les bactéries méthanogènes et elles résistent davantage aux variations de pH et de température (Blais et Tyagi, 2000).

Bien que les procédés mésophiles (30-40°C) et thermophiles (50-60°C) soient les plus couramment utilisés (Chynoweth *et al.*, 1999), des recherches sur les procédés psychrophiles (5-20°C) sont actuellement en cours (Massé, 1995 ; Massé et Droste, 1997 ; 2000b ; Nozhevnikova *et al.*, 1999).

1.6.2.3 Compostage

Le compostage du lisier de porc fait appel à la dégradation aérobie de la matière organique. L'oxydation biologique du substrat organique est exothermique et il est possible de distinguer trois phases d'évolution des températures : mésophile (30 à 40°C), thermophile (jusqu'à 70°C) et refroidissement aux températures ambiantes. La phase thermophile présente une importance majeure puisqu'elle assure l'élimination des organismes pathogènes et des mauvaises herbes (Potvin et Bernard, 1995). Le processus de compostage

mène à la production de dioxyde de carbone et d'eau. Le compost, produit final, est constitué de matières organiques stabilisées et de minéraux (Potvin et Bernard, 1995).

Il est toutefois essentiel d'ajouter au lisier des matériaux carbonés afin d'améliorer la structure du lisier, d'en diminuer l'humidité et d'en accroître le ratio C/N (Maheux *et al.*, 1996). D'ailleurs, le processus de compostage est optimisé pour un rapport C/N situé entre 30 et 35, un pourcentage d'humidité de 60 à 75 % et une teneur en oxygène variant entre 5 et 15 % (Theobald, 1992).

1.6.2.4 Marais filtrants

Les marais filtrants utilisent le métabolisme des végétaux pour épurer le lisier de porc de ces éléments fertilisants. Les plantes sont cultivées dans des étangs artificiels peu profonds et elles doivent être récoltées à la fin de chaque saison végétative pour empêcher un retour des fertilisants au fond du marais et par conséquent, une saturation de ce milieu récepteur. Gingras *et al.* (1998) sont d'avis que les marais filtrants constituent davantage une technologie de polissage d'effluent plutôt que de traitement proprement dit.

La comparaison entre les points forts et les points faibles des différents procédés de traitement biologiques est possible à l'aide des informations contenues au tableau 4 présenté ci-après.

Tableau 4 Avantages et inconvénients des procédés biologiques

Traitement aérobie	
<u>Avantages :</u>	<ul style="list-style-type: none">• Diminution des odeurs ;• Enlèvement des surplus d'azote ;• Amélioration de la manutention à l'entreposage et à l'épandage (Westerman <i>et al.</i>, 2000) ;• Temps d'épuration assez rapide (Svoboda et Jones, 1999).
<u>Inconvénients :</u>	<ul style="list-style-type: none">• Pertes d'ammoniac (NH₃) et d'oxydes nitreux (NO_x et N₂O) (Gingras <i>et al.</i>, 1998) ;• Pertes de CO₂ (Theobald, 1992) ;• Sensible aux variations de charges du lisier (Kalyuzhnyi <i>et al.</i>, 1999).
Traitement anaérobie	
<u>Avantages :</u>	<ul style="list-style-type: none">• Production de biogaz récupérables pour la production d'énergie ;• Faible production de boues ;• Efficace pour des effluents chargés ($\geq 3\ 000\ \text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ DCO) ;• Faibles coûts d'opération (sans apport d'oxygène) (Blais et Tyagi, 2000) ;• Réduction des odeurs ;• Diminution des pathogènes (Chynoweth <i>et al.</i>, 1999).
<u>Inconvénients :</u>	<ul style="list-style-type: none">• Temps d'épuration assez long (Svoboda et Jones, 1999) ;• Activités bactériennes réduites à basse température ;• Nécessité dans la plupart de cas de post-traitement pour accroître l'enlèvement du carbone et de nutriments résiduels ;• Longue période d'acclimatation de la biomasse ;• Sensibilité accrue aux variations de pH et à la présence de substances toxiques ;• Risques d'explosion et d'incendie en raison de la production de biogaz ;• Coûts élevés d'immobilisation ;• Opération complexe (Blais et Tyagi, 2000).
Compostage	
<u>Avantages :</u>	<ul style="list-style-type: none">• Réduction du volume de lisier ;• Élimination des organismes pathogènes et des mauvaises herbes ;• Stabilisation de l'azote et de la matière organique ;

-
- Atténuation des odeurs ;
 - Diminution de la teneur en eau du lisier ;
 - Concentration de la valeur fertilisante (Potvin et Bernard, 1995).

Inconvénients :

- Nécessité d'ajouter un substrat carboné ;
 - Production de lixiviats ;
 - Pertes d'azote et de potassium (Potvin et Bernard, 1995) ;
 - Risque d'accumulation de métaux tel le cuivre (Maheux *et al.*, 1996).
-

Marais filtrant

Avantages :

- Réduction d'éléments fertilisants tels le phosphore et l'azote (Gingras *et al.*, 1998).

Inconvénients :

- Performance réduite pendant la saison hivernale ;
 - Épuration réduite pour des effluents fortement chargés ;
 - Nécessité d'étangs de grandes surfaces dans le cas d'effluents chargés, obligation de récolter les végétaux (Gingras *et al.*, 1998).
-

1.6.3 Procédés chimiques

1.6.3.1 Acidification, oxydation et chaulage

Les procédés chimiques visent à transformer chimiquement les composantes du lisier de porc et par le fait même, ces caractéristiques physiques, biologiques ou chimiques. Les produits chimiques ajoutés sont généralement des oxydants (peroxydes, permanganates, persulfates, ozone), des acides ou de la chaux. L'oxydation, l'acidification et le chaulage inhibent l'activité bactérienne responsable entre autres des odeurs désagréables. Dans le cas du chaulage, il y a également amendement du lisier.

Le tableau 5 résume l'essentiel des avantages et des inconvénients associés aux procédés chimiques.

Tableau 5 Avantages et inconvénients des procédés chimiques

Acidification, oxydation et chaulage

Avantages :

- Diminution des odeurs ;
- Stabilisation de la fraction solide du lisier ;
- Désinfection (Gingras *et al.*, 1998).

Inconvénients :

- Accroissement du volume dans le cas du chaulage ;
- Émissions importantes de gaz dont le sulfure d'hydrogène (H₂S) et l'ammoniac (NH₃) ;
- Manipulation de produits potentiellement dangereux (Gingras *et al.*, 1998).

1.6.4 Procédés thermiques

1.6.4.1 Séchage

Le principe général des procédés de séchage du lisier de porc consiste en l'évaporation de la fraction liquide de ce dernier. Le produit final est un solide riche en fertilisants qui peut être mis en cube ou en granule.

Les bénéfices et les désavantages des procédés thermiques sont énumérés au tableau 6.

Tableau 6 Avantages et inconvénients des procédés thermiques

Séchage thermique

Avantages :

- Destruction des pathogènes ;
- Conservation des fertilisants : le phosphore et une partie de l'azote et du potassium (Gingras *et al.*, 1998) ;
- Diminution des odeurs (Theobald, 1992).

Inconvénients :

- Importants besoins en énergie (Gingras *et al.*, 1998).

1.6.5 Procédés physico-chimiques

1.6.5.1 *Oligolyse*

Le procédé d'oligolyse est un traitement électrochimique du lisier de porc qui vise à empêcher la croissance des microorganismes qui contribuent aux mauvaises odeurs. À l'aide d'électrodes cuivre-carbone, cuivre-cuivre ou fer-fer introduites dans des réservoirs à lisier (Gingras *et al.*, 1998), des électrolytes tels le Cu^{2+} et le Fe^{3+} sont générés afin d'inhiber toute activité microbienne (Dutil *et al.*, 1994).

1.6.5.2 *Décantation avec coagulation et/ou floculation*

Le procédé de décantation avec coagulation et/ou floculation est une forme de traitement du lisier de porc qui allie l'aspect physique de la séparation par gravité à l'aspect chimique de l'ajout de coagulants et de floculants. Le coagulant agit au niveau de la charge des particules colloïdales soit en les neutralisant, soit en leur fixant une charge positive ou négative et, aide à l'agrégation des particules. Quant au floculant, il favorise la formation de floes (ou floculats) par l'agglutination des agrégats de particules colloïdales chargées ou non. En somme, les éléments organiques ou minéraux insolubles et agglomérés en floculats peuvent être soutirés du lisier à la suite de la décantation des floes.

Le sulfate d'alumine et le chlorure ferrique sont quelques-uns des coagulants connus. Quant aux floculants, ils sont regroupés selon qu'ils soient organiques naturels comme la cellulose ou le chitosane ou synthétiques tels les polyélectrolytes non anioniques, anioniques ou cationiques.

Il est à noter que les performances de la séparation mécanique sont également bonifiées par la coagulation et la floculation (Gingras *et al.*, 1998).

Les procédés physico-chimiques possèdent des avantages et des inconvénients qui sont détaillés au tableau 7.

Tableau 7 Avantages et inconvénients des procédés physico-chimiques

Oligolyse	
<u>Avantages :</u>	
•	Réduction des odeurs ;
•	Conservation des éléments fertilisants (Gingras <i>et al.</i> , 1998) ;
•	Homogénéisation du lisier (Dutil <i>et al.</i> , 1994).
<u>Inconvénients :</u>	
•	Accumulation de cuivre dans le lisier (Dutil <i>et al.</i> , 1994).

Décantation avec coagulation et floculation	
<u>Avantages :</u>	
•	Diminution du phosphore et de l'azote (Theobald, 1992) ;
•	Enlèvement des ST, MES, DCO et DBO ₅ (Gao, 1993).
<u>Inconvénients :</u>	
•	Effets inconnus des coagulants/floculants sur l'environnement et le rendement des cultures (Gingras <i>et al.</i> , 1998) ;
•	Faible % ST de la fraction solide (<10 %) (Voermans et Kleijn, 1988).

1.6.6 Technologies de traitement commercialisables

Les divers procédés présentés antérieurement sont utilisés, seuls ou en combinaison, dans des technologies commercialisables. Ainsi, le tableau 8 détaille les principales technologies qui ont été répertoriées par Gingras *et al.* (2001) dans le cadre du Plan agroenvironnemental de la production porcine. Les informations fournies concernent le nom de la technologie et la date des informations, la nature du procédé principal, l'échelle d'application, le type de traitement et la ventilation (immobilisation et opération) des coûts³.

³ Coûts d'immobilisation = coûts d'acquisition et d'installations amortis sur la durée de vie utile + coûts du capital. Coût d'opération = frais de main d'œuvre et de forfait + frais d'énergie + frais des intrants. Équipements comptabilisés à neuf malgré le fait que des équipements déjà en place pourraient réduire les coûts. Coûts de la gestion des sous-produits exclus.

Tableau 8 Synthèse des détails techniques et économiques des technologies commercialisables

Technologies	Natures du procédé principal	Échelles d'application	Types des traitements	Coûts	
Biorek® 09/2000	Biologique : Digestion anaérobie	Ferme (moy. et gran.) et régional (centralisé)	Complet (sur la fraction liquide)	Immobilisation : Opération : Totaux ^a :	10-15 \$·m ⁻³ 5-10 \$·m ⁻³ 15-20 \$·m ⁻³
Solution Biofertile 09/2000	Biologique : Digestion aérobie	Ferme et semi-centralisé	Complet (sur la fraction liquide)	Immobilisation : Opération : Totaux ^b :	5-10 \$·m ⁻³ < 5 \$·m ⁻³ 5-10 \$·m ⁻³
Manurex (Purin Pur) 09/2000	Mécanique : Séparation mécanique et filtration	Non disponible	Complet (sur la fraction liquide)	Immobilisation : Opération : Totaux ^c :	5-10 \$·m ⁻³ < 5 \$·m ⁻³ 10-15 \$·m ⁻³
SLS Technologies 09/2000	Mécanique : Séparation mécanique (centrifugation et floculation)	Non disponible	Partiel	Immobilisation : Opération : Totaux ^d :	5-10 \$·m ⁻³ < 5 \$·m ⁻³ 10-15 \$·m ⁻³
Procédé Breton 03/2001	Mécanique : Séparation mécanique (tamis et floculation)	Non disponible	Partiel	Immobilisation : Opération : Totaux ^e :	< 5 \$·m ⁻³ < 5 \$·m ⁻³ 5-10 \$·m ⁻³
Compost Air ^{MD} 09/2000	Biologique : Compostage	Non disponible	Non disponible	Immobilisation : Opération : Totaux ^f :	< 5 \$·m ⁻³ 5-10 \$·m ⁻³ 5-10 \$·m ⁻³
Éco-Compost 09/2000	Biologique : Compostage	Non disponible	Non disponible	Immobilisation : Opération : Totaux ^g :	< 5 \$·m ⁻³ 10-15 \$·m ⁻³ 10-15 \$·m ⁻³
Biosor ^{MD} 09/2000	Mécanique : Biofiltration	Non disponible	Complet (sur la fraction liquide)	Immobilisation : Opération : Totaux ^h :	5-10 \$·m ⁻³ 5-10 \$·m ⁻³ 10-15 \$·m ⁻³

- a Unité de référence : $14\,600\text{ m}^3\text{ lisier}\cdot\text{an}^{-1}$; Exclut les revenus possibles de la vente des sous-produits.
- b Unité de référence : $20\text{ m}^3\text{ lisier}\cdot\text{jour}^{-1}$; Durée de vie utilisée : 15 ans.
- c Unité de référence : $15\,000\text{ m}^3\text{ lisier}\cdot\text{an}^{-1}$; Le calcul des coûts d'opération comprend le remplacement des membranes à tous les cinq ans.
- d Unité de référence : $2\,740\text{ m}^3\text{ lisier}\cdot\text{an}^{-1}$.
- e Unité de référence : $14\,976\text{ m}^3\text{ lisier}\cdot\text{an}^{-1}$ (environ 7 500 porcs place).
- f Unité de référence : $13\,963\text{ m}^3\text{ lisier}\cdot\text{an}^{-1}$; Exclut les coûts du biofiltre.
- g Unité de référence : $13\,000\text{ m}^3\text{ lisier}\cdot\text{an}^{-1}$.
- h Unité de référence : $14\,600\text{ m}^3\text{ lisier}\cdot\text{an}^{-1}$.

1.6.7 Technologie de traitement sujet du présent mémoire

La technologie à l'étude, soit la technologie de traitement du lisier de porc par flottation biologique, s'inscrit dans le cadre de la stratégie environnementale de la mise en place d'un traitement du lisier associé au mode de gestion solide-liquide. La technologie se présente sous la forme d'un traitement à la ferme, mais elle peut s'insérer à un traitement centralisé si la ferme est située dans une région en surplus.

Il importe dans un premier temps de situer le procédé de traitement dans la chaîne de gestion conventionnelle du lisier de porc. La représentation schématique qui suit illustre la position qu'occupe le procédé de traitement.

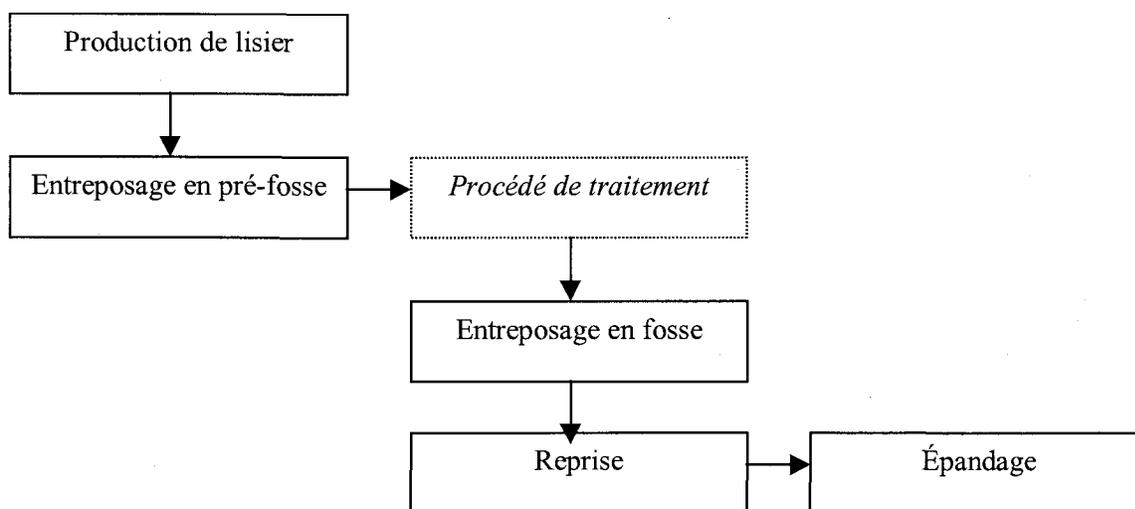


Figure 2 Position du procédé de traitement dans la chaîne de gestion du lisier

Le schéma suivant présente une vue d'ensemble des différentes constituantes du procédé de traitement par séparation physico-chimique avec polissage (optionnel) sur filtre à base de tourbe.

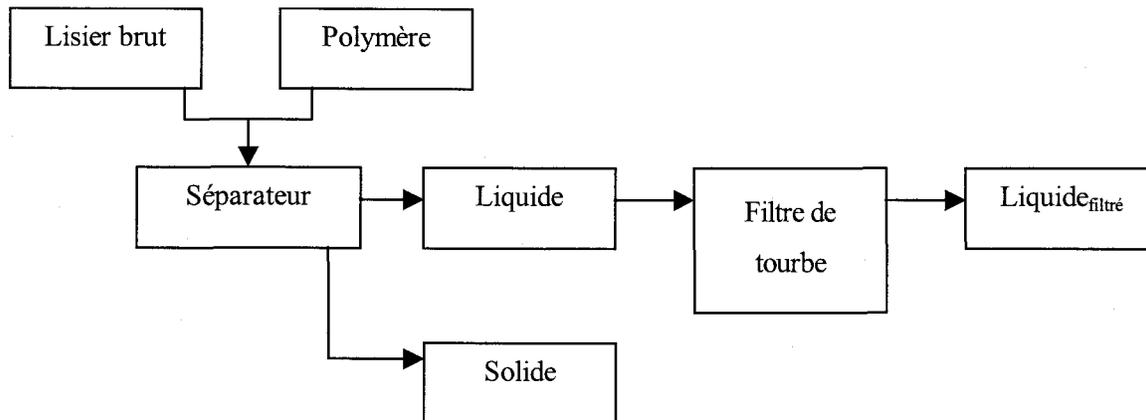


Figure 3 Schéma des principales constituantes du procédé de traitement à l'étude

Le système d'alimentation en lisier du séparateur joue un double rôle : zone de mélange pour le lisier brut et le polymère synthétique et acheminement du mélange à l'intérieur du séparateur. Ce dernier constitue l'élément central de la technologie puisqu'il est le siège de la séparation du lisier par flottation biologique. Les sous-produits du procédé de traitement sont une fraction solide, une fraction liquide, une fraction liquide filtrée (facultative), de la tourbe usée et des émissions gazeuses.

1.7 Technologie de traitement du lisier de porc par flottation biologique

La revue de littérature démontre que les applications de technologies de séparation solide-liquide du lisier de porc par flottation semblent assez limitées. Seuls quelques travaux faisant mention de la séparation du lisier par flottation ont été répertoriés (Aquatech Société de gestion de l'eau, 1987 ; Tremblay *et al.*, 1999).

Cette section vise à présenter dans un premier temps les principes théoriques sous-jacents aux technologies de séparation de rejets liquides par flottation. La flottation biologique et la coagulation-floculation sont au nombre de ces principes. Dans le même ordre d'idée, le polissage d'effluents sur filtre de tourbe est également abordé. Dans un second temps, il expose les attentes des divers intervenants du milieu de la production porcine face aux innovations technologiques du traitement de lisier de porc. Enfin, en troisième lieu, quelques objectifs de traitement visés par une technologie de séparation du lisier de porc sont détaillés.

1.7.1 Flottation biologique

La présente section définit dans un premier temps la flottation et, vérifie son application dans la séparation du lisier de porc. Ensuite, elle expose les concepts théoriques attachés à la flottation. Enfin, elle explore la conception d'un flottateur.

1.7.1.1 Définitions et applicabilité au lisier de porc

La flottation est utilisée pour la séparation solide-liquide de rejets d'eaux usées domestiques et industrielles ainsi que pour l'épaississement des boues. La flottation naturelle, la flottation assistée et la flottation provoquée catégorisent les procédés de flottation (Degremont, 1989). Ils se différencient entre autres par la masse volumique des particules à flotter (tableau 9).

Tableau 9 Classification des procédés de flottation

Masse volumique des particules	Procédés de flottation à privilégier
Inférieure au liquide	Flottation naturelle
	Flottation assistée
Supérieure au liquide	Flottation provoquée

La flottation est naturelle lorsque les particules flottent sans intervention alors que la flottation assistée fait appel à des moyens externes pour bonifier la flottation dite naturelle. Par la flottation provoquée, la masse volumique des particules à flotter est réduite virtuellement par le biais de la formation d'attelages particule-gaz moins denses que le liquide. Noter que les procédés de flottation à air dissous s'insèrent dans cette dernière catégorie.

Le lisier de porc présente un potentiel de séparation par flottation. En effet, Ziegler et Hédit (1991) font remarquer que le lisier de porc, entreposé dans des fosses non brassées, tend à se séparer en trois couches distinctes :

- Un sédiment à caractère organique riche en azote organique et en phosphore ;
- Une fraction liquide contenant les éléments minéraux solubles dont l'azote ammoniacal et le potassium ;
- Une croûte constituée de matières cellulosiques qui flotte en surface.

Bien que certains constituants du lisier de porc tendent à flotter naturellement, la flottation des constituants qui sédimentent est impérative d'où la nécessité d'utiliser la flottation provoquée pour une séparation optimale du lisier.

1.7.1.2 Théorie de la flottation provoquée

La mécanique de la flottation provoquée dépend des attelages particule-gaz issus de l'affinité entre des particules solides et des bulles de gaz. Degrémont (1989) fait mention d'un phénomène triphasique (gaz-solide-liquide) où les caractéristiques physico-chimiques des phases et particulièrement de leurs interfaces sont mises en jeu.

Il est pratique courante d'ajouter une étape de floculation précédant celle de la flottation provoquée (Degrémont, 1989). Des observations de Henriksen *et al.* (1998) corroborent ce fait puisqu'ils font remarquer que les gaz piégés dans les floccs diminuent leur densité. La figure suivante illustre un attelage floc-gaz.

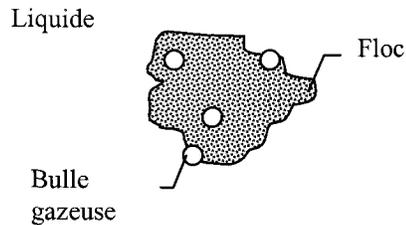


Figure 4 Schéma d'un attelage floc-bulle

La flottation d'un attelage floc-gaz est générée par des forces de gravité, de poussée et de traînée dont la résultante induit une vitesse ascensionnelle à l'attelage (Degrémont, 1989). L'équation de Stokes, issue de l'analyse de ces forces⁴, décrit la vitesse ascensionnelle d'un attelage floc-gaz (Degrémont, 1989).

Équation 1 Vitesse ascensionnelle (V) d'un attelage floc-gaz

$$V = \frac{g}{18\eta}(\rho_l - \rho_s)d^2$$

où g : accélération gravitationnelle, m·s⁻²

η : viscosité dynamique, N·s·m⁻²

ρ_l : masse volumique du liquide, kg·m⁻³

ρ_s : masse volumique de l'attelage floc-gaz, kg·m⁻³

d : diamètre de l'attelage floc-gaz, m

Cette équation est valable⁵ pour un régime hydraulique laminaire (non turbulent) et une particule sphérique.

⁴ Il est possible de consulter la démonstration de cette équation à l'annexe A de ce document.

⁵ Des adaptations pour des régimes hydrauliques autres que laminaires et des particules différentes de la sphère sont présentées à l'annexe A.

Il importe maintenant d'approfondir les caractéristiques des floes physico-chimiques et des bulles de gaz influant sur les performances de la flottation qui sont grandement liées à l'ampleur de la différence de masses volumiques ($\rho_1 - \rho_s$) et au diamètre (d). Pour ce qui suit, la taille d'un attelage floe-bulle est assimilée au diamètre d'une sphère. Ainsi, la différence de masses volumiques sera majorée par la floculation puisque les particules floculées offrent une surface majorée qui multiplie les possibilités d'accrochage des bulles de gaz (Degrémont, 1989). Or, selon l'équation de Stokes, la vitesse ascensionnelle augmentera proportionnellement à la différence de densités entre le liquide et l'attelage. Cet accroissement de la vitesse sera d'autant plus marqué que la vitesse est proportionnelle au carré du diamètre de l'attelage floe-bulle. Par contre, une trop grande augmentation du diamètre de l'attelage floe-bulle peut annihiler la majoration de la différence des densités en raison de la diminution de la surface spécifique (surface/volume ou surface/masse) de l'attelage floe-bulle (Degrémont, 1989). En fait, à quantité d'air fixé constante, il y aura moins de bulles par unité de surface. La vitesse ascensionnelle se trouve ainsi réduite.

Noter que la floculation accroît les qualités hydrophobes des particules floculées entre autres par l'utilisation de polymères du type des polyacrylamides (Bolto *et al.*, 1996). Les bulles de gaz étant de nature hydrophobe, le processus d'adhésion des bulles sur les floes est amélioré (Mels *et al.*, 2001) et par le fait même, les performances de la flottation.

Quant aux bulles de gaz, il est important que leur vitesse ascensionnelle soit faible par rapport à la masse liquide dans laquelle baignent les floes en suspension afin qu'elles puissent se fixer aux floes sans les briser (Degrémont, 1989). Ceci implique que le diamètre des bulles de gaz doit être bien inférieur à celui des floes (le diamètre étant lié à la vitesse ascensionnelle) (Degrémont, 1989). Enfin, une concentration accrue de bulles de gaz ayant une bonne répartition décupleront les possibilités d'accrochage (Degrémont, 1989).

1.7.1.3 Mécanismes de génération de bulles de gaz

La production et la dispersion de bulles de gaz, essentielles à la flottation, peuvent être générées grâce à des moyens physiques, chimiques ou électrolytiques. Il est également possible que la génération de gaz se produise biologiquement d'où l'appellation de

flottation provoquée biologique ou simplement flottation biologique. Ce type de flottation constitue le sujet de la présente étude. La flottation biologique exploite la production gazeuse issue de l'activité des microorganismes présents dans l'effluent à traiter (Blais et Tyagi, 2000). Saiki *et al.* (1999) ont également expérimenté un procédé de flottation dont les bulles de gaz sont générées par auto-digestion. Les résultats de sa recherche montrent que des changements de température, de pH ou de conditions d'oxygénation dans l'environnement dans lequel évoluent les bactéries stimulent la production gazeuse par auto-digestion.

1.7.1.4 Paramètres de conception et d'opération

L'absence d'informations sur la conception et l'opération de procédés de flottation biologique pour le lisier de porc fait en sorte que les paramètres de conception et d'opération de procédés de flottation à air dissous pour des eaux usées seront présentés, à titre indicatif, étant donné leur appartenance à la même catégorie de flottation, soit provoquée.

Quasim (1994) suggère les paramètres de conception et d'opération qui sont détaillés dans le tableau qui suit.

Tableau 10 Paramètres de conception et d'opération d'un flottateur à air dissous

Paramètres	Unités	Formules	Valeurs typiques ⁶
Ratio air/solide	Sans dimension	$= \frac{\text{débit massique d'air dissous disponible}}{\text{débit massique de solides en suspension de l'affluent}}$	0,04-0,07
Charge de solides	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{j}^{-1}$	$= \frac{\text{débit massique de solides en suspension de l'affluent}}{\text{surface du flottateur}}$	90-200
Charge hydraulique	$\text{m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{j}^{-1}$	$= \frac{\text{débit volumique de l'affluent}}{\text{surface du flottateur}}$	90-250
Ajout de polymère	$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	$= \frac{\text{masse de polymère utilisée}}{\text{masse de solides en suspension de l'affluent}}$	1 000-4 000

1.7.1.5 Système d'élimination des boues de fond

Degrémont (1989) souligne l'impossibilité de faire flotter la totalité des matières en suspension pour les eaux résiduaires. En fait, les particules en suspension très lourdes échapperont à la flottation et, s'accumuleront au fond du flottateur d'où la nécessité d'incorporer au design un système d'élimination des boues de fond. Ce système peut prendre la forme d'un fond fortement conique ou d'un racleur de fond (Degrémont, 1989).

1.7.1.6 Système d'élimination des boues flottées

Les systèmes d'élimination des boues flottées permettent de recueillir les boues flottées et de les acheminer vers leur lieu d'élimination. Mels *et al.* (2001) a conclu à la suite d'une étude que la fréquence d'enlèvement par raclage des boues flottées a une incidence sur leur

⁶ Les valeurs typiques sont pour une boue primaire dont la concentration en solides totaux varient entre 3 et 6 % (Quasim, 1994).

concentration en solides totaux. Ainsi, un raclage en continu produit une boue flottée de concentration moyenne de 3,6 % de solides totaux alors qu'un raclage intermittent (aux 2,5 à 4 h) fournit une boue flottée de 9,4 % de solides totaux en moyenne.

1.7.2 Coagulation-floculation

La présente section définira d'abord les phénomènes de la coagulation et de la floculation. Les mécanismes physiques et chimiques entrant en jeu lors de la coagulation et la floculation seront également abordés. Ensuite, la nature et les particularités des polymères synthétiques seront explicitées. En dernier lieu, des cas d'utilisation de polymères pour le lisier de porc seront relatés.

1.7.2.1 Définitions et mécanismes

La coagulation consiste à déstabiliser les particules en suspension (colloïdales) afin de permettre leur agrégation alors que la floculation est essentiellement rattachée au phénomène d'agglutination des particules coagulées c'est à dire à leur augmentation de volume (Tchobanoboulos et Schroeder, 1987).

Quels mécanismes de la coagulation et de la floculation entrent en jeu lors de l'ajout de coagulants et de floculants ? Les mécanismes de la coagulation visent à briser l'état stable des particules pour qu'elles puissent s'agréger. L'état de stabilité entre les particules colloïdales s'explique par leur petite taille qui fait en sorte que les forces de répulsion électrique surpassent les forces d'attraction entre les particules (Tchobanoboulos et Schroeder, 1987). Pour les applications touchant aux eaux usées, Tchobanoboulos et Schroeder (1987) retiennent trois principaux mécanismes : la neutralisation des charges, les liaisons entre les particules et l'incorporation à des précipités. La neutralisation des charges a lieu lors de l'adsorption de cations à la surface des particules. Les liaisons entre les particules se produisent lorsque les chaînes de polymère se fixent à plusieurs particules. Quant aux incorporations à des précipités, ils proviennent de la formation de précipités qui emprisonnent des particules en suspension.

La mécanique de la floculation se limite aux collisions entre les particules coagulées qui favorisent la formation de floculats de plus en plus volumineux (Tchobanoboulos et Schroeder, 1987). Les collisions entre les particules sont favorisées par des gradients de vitesse dans le liquide d'où la nécessité de l'agiter.

Tous ces mécanismes sont fortement influencés par les caractéristiques physico-chimiques de l'effluent à traiter qui sont : la distribution de la granulométrie des particules, la charge des particules, la concentration des solides en suspension, le pH et la température (Zhang et Lei, 1998).

1.7.2.2 Nature et particularités des polymères synthétiques

Pour les besoins de cette recherche, il importe de s'attarder aux polymères synthétiques utilisés principalement pour la coagulation et la floculation. La majorité des informations présentées ci-après proviennent d'un document produit par LeDuy *et al.* (1987).

Les polyacrylamides et leurs dérivés constituent la principale classe de polymères synthétiques. Ils sont mieux connus sous l'acronyme «PAM». Ils sont issus de la polymérisation de l'acrylamide et d'autres monomères (Zhang et Lei, 1998). Le poids moléculaire, une des caractéristiques des polymères, est proportionnel au nombre de monomères qui le composent. La figure ci-contre expose la formulation d'une molécule de polyacrylamide (Degrémont, 1989).

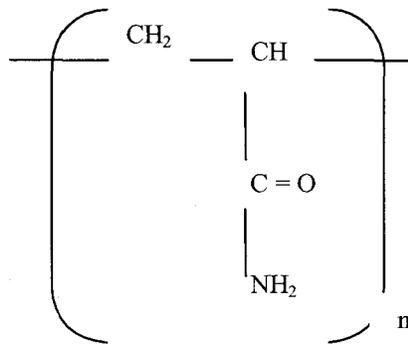


Figure 5 Schématisation d'une molécule de polyacrylamide

L'autre particularité des polymères est la densité de charge qui est proportionnelle au nombre de groupements ioniques qui proviennent de la copolymérisation de monomères chargés avec le polyacrylamide qui est originellement de nature non ionique. La copolymérisation de l'acide acrylique avec l'acrylamide ou l'hydrolyse partielle du polyacrylamide donnent les polymères anioniques. Pour les polymères cationiques, il faut co-polymériser de l'acrylamide avec des monomères qui sont généralement du méthacrylate de diméthylamino-éthyle (Madam) ou d'acrylate de diméthylamino-éthyle (Adam) (Degrémont, 1989). La figure suivante présente une schématisation des polymères cationiques.

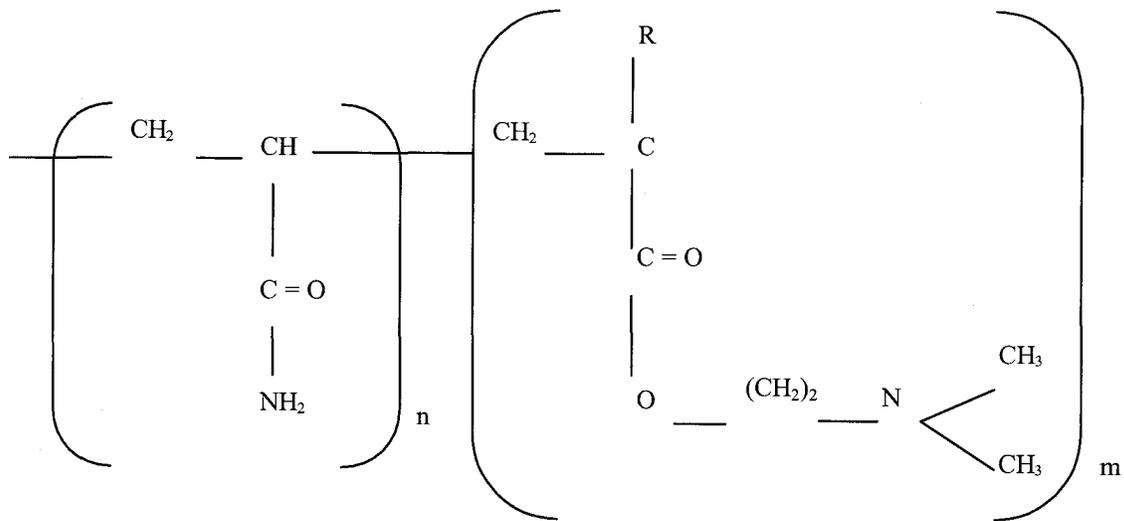


Figure 6 Schématisation d'une molécule de polymères cationiques

Noter finalement que le radical R correspond à du CH_3 pour le Madam et à du H pour le Adam.

1.7.2.3 Applications au lisier de porc

Tchobanoboulos et Schroeder (1987) avancent que les particules colloïdales sont généralement de charges négatives. Stumm et O'Melia (1968) reconnaissent également ce fait pour les particules organiques en suspension dans des eaux usées neutres ou alcalines.

Ces éléments corroborent les résultats d'études (Aquatech Société de gestion de l'eau, 1984 ; Gao, 1993 ; Vanotti et Hunt, 1999) qui démontrent que le lisier de porc nécessite l'utilisation de polymères cationiques. Par exemple, Sievers *et al.* (1994) arrivent à la conclusion qu'un polymère de densité de charges élevée et de poids moléculaire très élevé est le plus efficace pour l'enlèvement des solides du lisier de porc ayant subi une dilution préalable.

1.7.3 Polissage sur filtre de tourbe

Cette section couvre la théorie relative au polissage sur filtre de tourbe. Premièrement, une définition de la tourbe et ses caractéristiques seront présentées. Deuxièmement, les mécanismes physiques, chimiques et biologiques impliqués dans les capacités d'épuration de la tourbe seront exposés brièvement. Troisièmement, les performances des filtres de tourbe seront détaillées. Enfin, le potentiel d'ajout d'un additif à la tourbe pour majorer ces performances d'épuration sera démontré.

1.7.3.1 Présentation de la tourbe et de ses mécanismes d'épuration

La tourbe se forme dans les milieux humides, pauvres en oxygène, où le taux d'accumulation de la matière végétale excède celui de la décomposition. Le surplus de matière végétale, partiellement fossilisée, constitue la tourbe. Elle est classifiée en fonction de ses degrés de décomposition qui sont en ordre croissant : fibrique, hémique et saprique (American Society for Testing and Materials (ASTM), 1995).

Les principaux mécanismes impliqués dans le pouvoir épurateur de la tourbe sont l'adsorption et la filtration et ils sont largement dépendants de ses propriétés polaires et poreuses (Couillard, 1994). Les échanges ioniques et la formation de complexes représentent les modes d'adsorption. Quant à la filtration, elle se produit lorsque le diamètre d'une particule solide est supérieur à celui des pores interstitiels. De surcroît, la tourbe apparaît être un environnement favorable au développement d'activités microbiologiques. Brooks et Zibilske (1983) associent notamment la diminution en azote d'effluents usés à l'activité de certains champignons. Cependant, Couillard (1994) signale, à la suite de sa revue de littérature, la nécessité de démontrer la capacité réelle de la tourbe à atténuer les concentrations de nutriments et ce, malgré le bon potentiel qu'elle présente.

1.7.3.2 Performances des filtres à base de tourbe

Le domaine de l'assainissement des eaux usées domestiques et industrielles exploite les qualités de la tourbe depuis de nombreuses années (Couillard, 1992 ; Viraraghavan et Ayyaswami, 1987). Les systèmes de filtration à base de tourbe ont prouvé leur efficacité

pour le contrôle de la pollution des eaux. En effet, de nombreuses recherches démontrent les performances des filtres à base de tourbe pour diminuer la demande biochimique en oxygène (50 % à 98 %), la demande chimique en oxygène (50 % à 90 %), les matières en suspension (75 % à plus de 99 %), les bactéries coliformes et les virus (Bélanger et Buelna, 1990 ; Brooks *et al.*, 1984 ; Couillard, 1992 ; 1994 ; Narasiah et Hains, 1988). De plus, selon Noren (1986), la tourbe peut contribuer au contrôle des odeurs du lisier en raison de sa capacité à adsorber l'ammoniac et le sulfure d'hydrogène. Enfin, la tourbe possède un bon potentiel d'enlèvement des nutriments provenant d'effluents agricoles et d'abattage (Viraraghavan et Kikkeri, 1988 ; Barton *et al.*, 1984 ; Gravelle et Landreville, 1980).

Toutefois, plusieurs auteurs ne recommandent pas l'utilisation de la tourbe seule pour l'élimination du phosphore (Rana et Viraraghavan, 1987 ; Nichols, 1983 ; Nichols *et al.*, 1983). D'autres inconvénients surviennent lors de l'emploi de la tourbe soit la coloration brun-foncé issue probablement des acides humique et fulvique de la tourbe (Brooks *et al.*, 1984 ; Buelna et Bélanger, 1989), la demande chimique en oxygène supplémentaire et la baisse de pH de l'effluent engendrées par la dégradation de la tourbe (Couillard, 1994).

1.7.3.3 Amélioration des propriétés de la tourbe par dopage

Le dopage de la tourbe avec des additifs particuliers peut accroître le potentiel de rétention de polluants par les systèmes de filtration à base de tourbe. À cet effet, Roberge (1992) a étudié la possibilité d'ajouter des boues rouges à la tourbe afin de majorer sa capacité d'enlèvement du phosphore.

Les boues rouges constituent un déchet de l'industrie de l'aluminium. Elles présentent de fortes concentrations en fer et en aluminium, des métaux reconnus pour leur affinité avec les phosphates (Couillard, 1983). Couillard (1983) a démontré que le pourcentage d'enlèvement des phosphates par les boues rouges seules s'élève à 20 % (à un pH variant entre 6,5 et 7). Par contre, Roberge *et al.* (1999) a prouvé l'efficacité de déphosphatation d'eaux usées domestiques à l'aide d'un filtre de tourbe dopée aux boues rouges. Le pourcentage d'enlèvement des phosphates était d'environ 95 % pour une charge hydraulique de 30 cm·j⁻¹.

Outre les effets bénéfiques des boues rouges sur l'élimination des phosphates, l'étude préliminaire de Couillard (1983) fait état de la présence de métaux toxiques dans ces dernières dont le plomb.

En conclusion, les caractéristiques de la tourbe confèrent au filtre à base de tourbe un potentiel de polissage intéressant qui pourrait être bonifié par le dopage aux boues rouges.

1.8 Critères d'évaluation des technologies

Les technologies de traitement du lisier de porc sont généralement évaluées selon des critères environnementaux, agronomiques, techniques, économiques et sociaux. Une liste exhaustive des critères d'évaluation utilisés lors de l'étude menée par le groupe multidisciplinaire du Plan agroenvironnemental de la production porcine est présentée ci-après (Gingras *et al.*, 1998).

Tableau 11 Critères d'évaluation des technologies émergentes

Critères d'évaluation
<u>Environnementaux :</u>
<ul style="list-style-type: none">• Réduction de l'émission de composés volatils polluants ;• Augmentation du taux de demande du produit ;• Réduction de transfert des polluants ;• Réduction des impacts négatifs associés à la consistance du produit ;• Réduction des impacts négatifs associés au volume à gérer ;• Diminution des risques de déversements nocifs ;• Diminution des risques d'accidents d'opération ;• Amélioration du contrôle de la dose et de l'uniformité des sous-produits à épandre ;• Besoins d'ajout de substances nocives ;• Besoins en biomasse et en énergie non renouvelables ;• Répartition dans le temps des apports aux cultures.
<u>Agronomiques :</u>
<ul style="list-style-type: none">• Conservation des éléments fertilisants ;• Concentration des éléments fertilisants ;• Contenu et valeur en matière organique du produit ;• Amélioration de l'homogénéité de la valeur fertilisante ;• Réduction de la compaction des sols ;• Prolongement de la période d'apport possible sur les cultures ;

-
- Élargissement de l'éventail des cultures réceptrices ;
 - Amélioration des performances zootechniques ;
 - Amélioration des conditions sanitaires des animaux ;
 - Réduction de la toxicité des produits.

Techniques :

- Adaptabilité au contexte québécois ;
- Adaptabilité à la gestion actuelle à la ferme ;
- Amélioration des conditions de manutention des produits ;
- Disponibilité des équipements et infrastructures requis ;
- Besoins en intrants (biomasse ou autres) ;
- Disponibilité des intrants (au niveau provincial) ;
- Besoins en support technique et en formation ;
- Disponibilité du support technique.

Économiques :

- Réduction des coûts d'investissement et d'opération;
- Réduction des volumes à gérer ;
- Sensibilité aux coûts de main d'œuvre ;
- Sensibilité aux coûts des intrants ;
- Potentiel d'accroissement de la charge animale ;
- Sensibilité à la taille de l'entreprise ;
- Sensibilité à la distance de transport du produit marché potentiel pour les sous-produits ;
- Coûts de formation et de support technique.

Sociaux :

- Impacts sur l'image publique de la production porcine ;
 - Réduction des nuisances olfactives ;
 - Réduction des tensions sociales en raison des risques environnementaux ;
 - Potentiel de diminution des restrictions à la production ;
 - Santé et bien-être du travailleur agricole.
-

Afin d'être en mesure d'évaluer le potentiel du procédé de traitement à l'étude par rapport aux critères d'évaluation, trois paramètres quantifiables ont été déterminés. Il s'agit du ratio azote ammoniacal/phosphore total de la fraction liquide, de la siccité de la fraction solide et des coûts encourus par le traitement du lisier de porc.

1.8.1.1 Ratio azote ammoniacal/phosphore total de la fraction liquide

Le ratio azote ammoniacal/phosphore total met en relation les nutriments azotés par rapport aux nutriments phosphorés disponibles à brève échéance pour les végétaux. Considérant que l'azote ammoniacal et que la quasi-totalité du phosphore sont disponibles pour les plantes, la notation utilisée sera $N-NH_4^+/P_t$ (Conseil de productions végétales du Québec

(CPVQ), 1996). Le lisier de porc possède un ratio $N-NH_4^+/P_t$ inférieur à celui prélevée par les plantes c'est à dire que la proportion de phosphore du lisier est supérieure à celle utilisée par les végétaux (Bailey *et al.*, 1998). Puisque les taux d'épandage sont habituellement basés sur les besoins azotés des cultures, il s'ensuit un excès dans les apports de phosphore. Ces surplus peuvent engendrer de graves problèmes environnementaux d'où l'impératif d'accroître le ratio $N-NH_4^+/P_t$ du lisier de porc en réduisant notamment la quantité de phosphore.

Le procédé de traitement du lisier de porc à l'étude projette donc de produire une fraction liquide ayant un ratio $N-NH_4^+/P_t$ égal ou supérieur à 7 (CPVQ, 1996). La valeur numérique de ce ratio limite les apports phosphorés dans les régions dont les sols sont déjà fort enrichis en phosphore.

1.8.1.2 Siccité de la fraction solide

La siccité de la fraction solide est associée à la concentration des solides totaux dans la fraction solide du lisier. Un pourcentage de solides totaux supérieur à 10 % est visé lors du traitement du lisier (déterminé selon les résultats de Tremblay *et al.*, 1999).

1.8.1.3 Coûts du traitement du lisier

Les travaux menés dans le cadre du Plan agroenvironnemental de la production porcine ont permis d'établir que les coûts totaux reliés au traitement du lisier varieraient entre 5 \$ et 20 \$ du mètre cube de lisier brut (Gingras *et al.*, 2001). Afin d'être compétitif au niveau économique, les coûts associés au traitement du lisier de porc par flottation biologique devront être égaux ou inférieurs à 5 \$ par mètre cube de lisier brut.

1.9 Valorisation des sous-produits

La présente section présentera le potentiel de valorisation de sous-produits qui sont, pour un procédé de traitement de séparation avec filtration optionnelle, les fractions solide et liquide et le médium filtrant (en l'occurrence la tourbe).

La fraction solide, concentrée en nutriments et en matières organiques, peut être utilisée directement comme engrais organo-minéral où les conditions agronomiques et environnementales le permettent. Étant donné la siccité de la fraction solide, les contraintes de transport sont amoindries faisant en sorte que l'exportation hors des zones de concentration est simplifiée et davantage économique (Les Consultants BPR, 1994 ; Gingras *et al.*, 1998). Dans le même ordre d'idée, la fraction solide peut être acheminée dans un centre de traitement centralisé. Enfin, la possibilité de composter la fraction solide en lui ajoutant des matières carbonées disponibles localement peut également être envisageable (Bailey *et al.*, 1998).

Quant à la fraction liquide, elle peut être totalement valorisée à la ferme productrice ou chez de proches receveurs. En fait, elle constitue une eau d'irrigation apte à équilibrer les besoins des cultures aux limitations du sol puisque l'élimination d'une partie importante du phosphore et dans une moindre mesure de l'azote a réduit sa valeur fertilisante par rapport au lisier brut (Les Consultants BPR, 1994). De plus, la fraction liquide peut, à certaines conditions, être recyclée comme eau de lavage ou, être rejetée au cours d'eau.

Pour ce qui est du médium filtrant, il peut être dégradé biologiquement par compostage s'il est de nature fortement organique comme dans le cas de tourbe. Par contre, il est possible que la valorisation de la tourbe soit limitée par une accumulation de métaux dans le cas de l'utilisation du dopage aux boues rouges.

Il importe également de mentionner que l'impact des polymères synthétiques semble limité compte tenu de leur nature organique et biodégradable (Barvenik, 1994). Toutefois, Gingras *et al.* (1998) émettent des réserves à propos des effets de certains flocculants sur l'environnement et les cultures. Il est reconnu que les polyacrylamides ne sont pas toxiques pour les humains, les animaux et les plantes (Thomas, 1964 ; Wallace et Wallace, 1986 ; Rothwell, 1974 ; McCollister *et al.*, 1965). Toutefois, les monomères d'acrylamide, issues d'une polymérisation incomplète⁷, sont reconnus comme étant neurotoxiques pour les

⁷ Les monomères d'acrylamide représentent une quantité variant de 0,05 % à 5,5 % du produit final (Croll *et al.*, 1974).

humains (Abdelmagid et Tabatabai, 1982 ; Croll *et al.*, 1974) et irritants pour la peau (Thomas, 1964). En raison de sa forte solubilité dans l'eau et de sa faible capacité d'adsorption (Brown *et al.*, 1980), les monomères d'acrylamide pourraient affecter la valorisation de certains sous-produits.

1.10 But de la recherche

De par l'importance économique de l'industrie du porc, il est indubitable de résoudre la problématique environnementale liée aux rejets excédentaires de lisier porcin. Le développement de technologies de traitement individuel ou centralisé constitue un élément important de la solution d'autant plus que la législation actuelle ouvre la porte au traitement des fumiers liquides par des procédés autorisés en vertu de la *Loi sur la qualité de l'environnement* (L.R.Q.q., c. q-2).

Dans ce contexte, le but de la recherche est de démontrer le potentiel d'une technologie de séparation du lisier porcin par flottation biologique avec polissage optionnel sur filtre à base de tourbe capable de préserver les qualités agronomiques du lisier tout en prévenant les problèmes liés à son utilisation.

1.11 Objectifs spécifiques de recherche et démarche expérimentale

Les objectifs spécifiques retenus pour atteindre le but de cette recherche se scindent en quatre classes d'étude :

1. Optimisation de la séparation de phases des lisiers de maternité, d'engraissement et de pouponnière ;
2. Expérimentation, à l'échelle du laboratoire, du procédé de séparation pour des lisiers de maternité, d'engraissement et de pouponnière ;
3. Expérimentation, à l'échelle pilote, du procédé de séparation pour les lisiers de maternité et d'engraissement ;

4. Analyse économique des coûts d'immobilisation et d'opération du procédé de séparation.

La démarche expérimentale menant à la concrétisation des objectifs spécifiques se résume en quatre séries d'essais.

1^{ère} série d'essais : étude et optimisation du phénomène de la séparation du lisier

Dans un premier temps, il s'agira de déterminer s'il est bénéfique, en terme d'enlèvement des phosphates, d'ajouter des boues rouges et de la poussière de sablage au lisier de maternité. Si oui, quels seront les dosages optimaux à ajouter ?

Dans un second temps, il faudra vérifier les avantages, en terme de séparation de phases, à utiliser les polymères synthétiques organiques et la poussière de sablage. Si les résultats s'avèrent positifs, le type de polymère sera à arrêter. L'optimisation du type de polymères sera étendue ultérieurement aux lisiers d'engraissement et de pouponnière.

Dès lors, il sera possible d'expérimenter la séparation du lisier de maternité et du lisier d'engraissement⁸ pour des volumes respectifs de 5 l et 1 l. Pour le lisier de maternité, le type de polymère et son dosage idéal ainsi que le temps de séparation par flottation devront être déterminés. Pour ce qui est du lisier d'engraissement, le type de polymère et son dosage optimal, les incidences des solides totaux et de la granulométrie du lisier sur la flottation de même que le temps de la flottation devront être fixés.

Enfin, l'identification préliminaire, et non exhaustive, des gaz dégagés lors de la séparation par flottation biologique du lisier d'engraissement sera nécessaire à une meilleure compréhension du phénomène de la flottation biologique.

⁸ À ce stade-ci des expérimentations, le lisier de pouponnière sera temporairement écarté puisque le volume de lisier produit par ce type d'élevage est moindre en comparaison avec les autres.

2^{ème} série d'essais : étude de la flottation à l'échelle du laboratoire

À l'aide d'un prototype de flottateur à l'échelle du laboratoire, les rendements de la séparation du lisier de maternité seront évalués pour deux modes de fonctionnement (cuvée et continu) à des fins comparatives. L'évaluation des performances de séparation pour un fonctionnement en mode continu sera par la suite étendue aux lisiers d'engraissement et de pouponnière.

3^{ème} série d'essais : étude de la flottation à l'échelle pilote

Le prototype de flottateur élaboré pour ces essais possèdera des proportions supérieures à celles du prototype de laboratoire. De prime abord, les performances de la séparation en mode cuvée pour le lisier de maternité seront étudiées. Par la suite, les essais porteront sur la séparation du lisier d'engraissement⁹ pour les modes d'opération en cuvée et en continu dans l'expectative de comparer les rendements obtenus. Parallèlement aux essais avec les lisiers de maternité et d'engraissement, le suivi de l'efficacité d'un filtre à base de tourbe sera complété.

4^{ème} série d'essais : étude des coûts d'immobilisation et d'opération

Simultanément aux essais en mode continu à l'échelle du laboratoire et à l'échelle pilote, les informations nécessaires à l'établissement des coûts d'opération telles les masses de réactifs seront notées. Pour ce qui est des coûts d'immobilisation, ils seront estimés à partir de données budgétaires.

⁹ La large part de la production de lisier qu'occupe l'engraissement justifie le choix de tester le prototype à l'échelle pilote avec le lisier d'engraissement dans un premier temps.



2. DÉMARCHE MÉTHODOLOGIQUE

Les essais de laboratoire ont été réalisés de mai 2000 à août 2000. Quant aux essais à l'échelle pilote, ils ont eu lieu entre mai 2001 et septembre 2001 inclusivement. Le présent mémoire inclut également les résultats d'autres étudiants ayant travaillé sur le projet de recherche de septembre 2000 à février 2001 (Imbeault, 2001 ; Leblanc, 2001).

2.1 Matériel et produits

La présente section détaille le matériel et les produits utilisés dont le lisier de porc, les agents de conditionnement et les matières carbonées. L'origine du produit, la prise d'échantillonnage, la conservation et les procédures particulières d'utilisation seront énoncés.

2.1.1 Lisier de porc

Le lisier de porc échantillonné provient de la ferme Aldo voisine de la Ferme expérimentale de l'Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA) dans la municipalité de St-Lambert-de-Lauzon au Québec. L'entreprise agricole possède plusieurs porcheries spécialisées dans chaque étape de la production et de l'élevage de porcs soit pouponnière, maternité et engraissement. Les types de lisier ayant été utilisés pour la présente recherche sont de maternité, d'engraissement et de pouponnière.

L'échantillonnage du lisier de porc se fait au niveau de la pré-fosse à l'aide du système d'évacuation vers les fosses extérieures. La pré-fosse constitue un réservoir relativement clos qui a un taux de renouvellement du lisier assez élevé (moins de cinq jours d'entreposage). Lors du pompage, le lisier est agité sommairement par les turbulences créées par la pompe. Au bout de quelques minutes d'agitation, l'échantillonnage du lisier est réalisé soit dans des barils de 200 l ou dans des bidons de 20 l. Le tableau suivant présente les détails des échantillonnages excluant ceux de la période de septembre 2000 à février 2001.

Tableau 12 Détails des échantillonnages de lisier

Lisier de maternité
<u>Contenants de 20 l :</u> 24/05/00, 15/06/00, 04/07/00, 14/07/00, 04/08/00.
<u>Contenants de 200 l :</u> 30/04/01, 03/05/01, 07/05/01, 09/05/01.
Lisier d'engraissement
<u>Contenants de 20 l :</u> 30/07/01, 06/08/01.
<u>Contenants de 200 l :</u> 18/06/01, 20/06/01, 26/06/01, 13/08/01, 14/08/01, 15/08/01, 19/09/01.

La conservation du lisier varie selon les volumes recueillis. Les barils de 200 l sont conservés à la température ambiante pour une période maximale d'une semaine. Les bidons de 20 l sont entreposés à 4°C en chambre froide pour une période maximale de trois semaines.

2.1.2 Agents de conditionnement

Les agents de conditionnement sont des produits chimiques, qui une fois mélangés au lisier, agissent au niveau de la coagulation et de la floculation des particules colloïdales de ce dernier. Les boues rouges et les polymères synthétiques organiques ont servi à la réalisation de cette recherche.

Les boues rouges, ayant un potentiel pour la coagulation des phosphates, proviennent de la Société d'électrolyse Alcan ltée de Jonquière. Ces boues, de consistance pâteuse, ont été livrées dans cinq chaudières de 20 l. Elles sont conservées dans ces contenants à la température de la pièce. Afin de faciliter le dosage, les boues doivent être séchées et broyées préalablement aux essais.

Les polymères synthétiques ayant servi aux essais sont classés en trois groupes : anioniques, cationiques et non-ioniques. Les polymères sont commercialisés par Ciba Spécialités

Chimiques Canada inc. et LPM technologies. Les polymères sont acheminés sous forme cristalline et ils doivent être conservés dans un endroit frais et sec. Pour la réalisation des essais, les polymères ont été préparés dans une solution aqueuse à une concentration de $1 \text{ g}\cdot\text{l}^{-1}$.

2.1.3 Matières carbonées

Les matières carbonées sont utilisées pour leur potentiel d'aide à la séparation de phase et pour leur qualité filtrante. D'une part, la poussière de sablage issue de la compagnie Proverco Inc. de Saint-Augustin-de-Desmaures, fabricant de plancher de bois franc, a servi pour des essais de séparation de phase du lisier. La poussière de sablage est recueillie à la sortie de l'usine. Elle constitue un résidu de production. La poussière de sablage est conservée dans des poches plastifiées aux conditions de température et d'humidité ambiantes.

D'autre part, le bran de scie, la ripe à cochon et la tourbe ont été utilisés pour la fabrication de filtre servant au polissage de l'effluent du procédé de traitement à l'étude. Le bran de scie et la ripe à cochon proviennent de l'entreprise Pouliot de Saint-Lambert-de-Lauzon oeuvrant dans la production de litière. Le bran de scie ne possède pas de qualité commerciale pour cette entreprise et, est considéré comme un rebus alors que la ripe à cochon est commercialisée. La tourbe de sphaigne blonde provient de la compagnie Premier Horticulture Ltée (Division Tourbière Premier) localisée à Rivière-du-Loup (Québec). Cette tourbe n'a subi aucun traitement avant son utilisation. Le bran de scie, la ripe à cochon et la tourbe sont conservés dans des sacs plastifiés aux conditions de température et d'humidité ambiantes.

2.2 Description des essais

Cette section décrit en détail les essais complétés en laboratoire et à l'échelle pilote. Les essais ont été regroupés en trois catégories : essais de séparation, essais de flottation en laboratoire et essais de flottation à l'échelle pilote. Le code et la description de chaque essai sont présentés au tableau 13.

Tableau 13 Descriptions et codes des essais réalisés au cours de la recherche

Code	Description	Nombre d'essais
Essais de séparation		
BRPS	Tests d'efficacité des boues rouges (BR) et de la poussière de sablage (PS)	4
PO	Tests de polymères	3
COL	Tests de flottation en colonnes	3
CON	Tests de flottation en cônes	5
GAZ	Étude des gaz dégagés lors de la flottation biologique	1
Essais de flottation en laboratoire ^a		
LABCU	Essais en mode cuvée	2
LABCO	Essais en mode continu	6
Essais de flottation à l'échelle pilote		
PILCU	Essais en mode cuvée	5
PILCO	Essai en mode continu	1
FIL	Suivi des performances du filtre à base de tourbe	4

^a Ces essais ont été réalisés dans le cadre des travaux de Leblanc (2001).

Les informations fournies pour tous les essais abordés dans cette section touchent à leur durée, au montage expérimental utilisé et à la procédure suivie. Elles sont complétées par la description de l'échantillonnage et la présentation des paramètres qualitatifs et quantitatifs recueillis pour fins d'analyses.

2.2.1 Essais de séparation

Ces essais couvrent trois aspects : la vérification de l'efficacité des boues rouges et de la poussière de sablage pour la séparation «BRPS», les tests de polymères «PO» et les tests de flottation en colonnes «COL» et en cônes «CON» et l'étude des gaz dégagés lors de la flottation biologique «GAZ».

2.2.1.1 Tests de l'efficacité des boues rouges et de la poussière de sablage

Les tests d'efficacité et d'optimisation des boues rouges et de la poussière de sablage visaient à étudier le potentiel déphosphorant des boues rouges (BR), seules ou en combinaison avec de la poussière de sablage (PS), sur le lisier brut (LB) de maternité. Ces essais se sont déroulés du 29 mai au 9 juin 2000, période incluant l'analyse des échantillons.

La procédure est similaire pour les quatre essais. Tous les mélanges de 200 ml ont été réalisés dans des erlenmeyers en verre de 500 ml. Les erlenmeyers étaient agités au moyen de plaques agitatrices révolutionnant à 250 rotations par minute (rpm) pour une période de temps donnée (2 h pour les essais BRPS01, BRPS03 et BRPS04 et 1 h pour l'essai BRPS02).

Cinq concentrations différentes ont été testées pour chaque essai. La composition des mélanges est exposée au tableau 14. Deux contrôles de LB (en triplicata) accompagnaient les essais soit un pour les essais BRPS01, BRPS03 et BRPS04 et un pour l'essai BRPS02. Noter que les masses sont exprimées en base sèche.

Tableau 14 Composition des mélanges pour les essais avec les boues rouges et/ou la poussière de sablage

Mélanges	Contrôle	1 ^{er}	2 ^{ième}	3 ^{ième}	4 ^{ième}	5 ^{ième}
BRPS01						
BR (mg·l ⁻¹)	0	250	500	1 000	2 000	4 000
BRPS02						
BR (mg·l ⁻¹)	0	5 000	10 000	20 000	40 000	80 000
BRPS03						
PS (g·l ⁻¹)	0,0	40,0	53,5	80,0	106	160
BRPS04						
BR (mg·l ⁻¹)	0	250	500	1 000	2 000	4 000
PS (g·l ⁻¹)	0,0	40,0	53,5	80,0	106	160

Les paramètres suivis étaient les solides totaux (ST) et les phosphates (PO_4^{3-}). Le pH et le potentiel d'oxydoréduction (POR) ont été mesurés au début et à la fin de la période d'essai.

2.2.1.2 Tests de polymères

Les tests de polymères regroupent les essais PO01, PO02 et PO03. Les effluents utilisés étaient le lisier brut de maternité seul et, additionné de poussière de sablage. Ces essais ont été réalisés du 16 juin au 3 août 2000. Des tests, qui ne sont pas présentés dans ce document, ont également été complétés sur le lisier brut d'engraisement et de pouponnière lors d'études subséquentes (Imbeault, 2001 ; Leblanc, 2001).

La préparation des polymères, des coagulants et des flocculants était analogue pour tous les essais. Les solutions de polymère à une concentration de $1 \text{ g}\cdot\text{l}^{-1}$ étaient préparées la veille des essais. Les fines particules de polymères étaient dissoutes dans l'eau distillée qui servait de solvant. Les solutions ont été agitées en continu pendant environ 12 h sauf dans le cas de la fabrication du polymère cationique Zetag 7654 qui a été mélangé pendant 1 h¹⁰.

L'essai PO01 a porté sur les polymères de type cationique, anionique et neutre utilisés de façon individuelle. La liste des polymères est présentée au tableau 15. Après avoir préparé les solutions de polymères, un volume de 200 ml de lisier brut était versé dans un bécher de 200 ml. Ensuite, l'ajout de 5 ml de polymère était effectué avant de procéder au mélange par transvasements dans un autre bécher initialement propre. Le mélange était transvidé à huit reprises. Des observations qualitatives au niveau des floccs, de la séparation et du surnageant ont été effectuées (tableau 17). Par la suite, la manœuvre a été répétée par l'ajout successif du polymère par tranche de 5 ml pour un total cumulatif de 10, 15, 20, 25 et 30 ml

¹⁰ À partir d'août 2000, les solutions de polymères étaient préparées comme suit : 1) Dans un contenant de 1000 ml, dissoudre 1 g de polymère dans 30 ml de méthanol ou d'acétone et compléter à 1 000 ml avec de l'eau du robinet. 2) Agiter, à l'aide d'un agitateur magnétique, la solution pendant un maximum de 1 h. La solution de polymère est conservée pendant 24 h aux conditions ambiantes.

de polymère. Les observations qualitatives ont été faites uniquement pour la concentration de 30 ml qui équivaut en pourcentage volume/volume à 13 % v·v⁻¹¹¹.

Tableau 15 Noms et caractéristiques des polymères utilisés pour l'essai PO01

Famille	Nom	Poids moléculaire ^a	Densité de charge ^a
Cationique	LPM 9511	M	H
	Zetag 7654	VH	VH
	Zetag 7689	H	VH
	Zetag 7557	M	H
	Zetag 7587	M	H
	Zetag 7692	L	H
	Zetag 7645	VH	VL
	Zetag 7623	VH	VL
Anionique	Magnafloc 10	M	VL
Neutre	Magnafloc 333	H	

^a Légende : VH (très haut), H (haut), M (moyen), L (bas), VL (très bas).

Pour ce qui est de l'essai PO02, il a été complété avec des polymères utilisés en combinaison. Dans un premier temps, la combinaison de polymères cationiques et anioniques a été testée. Le polymère cationique agissait comme coagulant et le polymère anionique, comme flocculant. Les types et les noms des polymères sont présentés au tableau 16. Cette combinaison a été vérifiée sur le lisier brut de maternité. Ainsi, 25 ml (11 % v·v⁻¹) de polymère cationique ont été ajoutés à 200 ml de lisier, puis le mélange a été agité par huit transvasements. Ensuite, des ajouts successifs de 5 ml d'un polymère anionique ont été réalisés pour un total cumulatif de 5, 10 et 15 ml. Chaque ajout était suivi d'agitation par transvasements. Noter que des évaluations qualitatives (tableau 17) ont été réalisées uniquement pour la concentration de 15 ml (6 % v·v⁻¹).

¹¹ Un exemple du calcul de % v·v⁻¹ de polymère est montré : 30 ml / (30 + 200) ml = 13 % v·v⁻¹.

Dans un second temps, la combinaison coagulant et floculant a été vérifiée. Contrairement au polymère cationique, le coagulant possède des chaînes moléculaires courtes. Les types et les noms des polymères sont présentés au tableau 16. Cette combinaison a été vérifiée sur le lisier brut de maternité. La procédure suivie se résume à ajouter 2 ml (1 % v·v⁻¹) de coagulant à 200 ml de lisier suivi d'une agitation par huit transvasements et à compléter par un ajout de 1 ml (0,5 % v·v⁻¹) de floculant toujours agité de façon similaire. Des observations qualitatives (tableau 17) ont été complétées pour la concentration de floculant de 0,5 % v·v⁻¹.

Tableau 16 Noms et caractéristiques des polymères utilisés pour l'essai PO02

Famille	Nom	Poids moléculaire ^a	Densité de charge ^a
Cationique	Zetag 7689	H	VH
Anionique	Magnafloc 338	H	VL
	Magnafloc 919	H	H
	Magnafloc 10	M	VL
	Magnafloc 155	M	L
	Coagulant	Magnafloc 368	VL
Floculant	Magnafloc 338	H	VL

^a Légende : VH (très haut), H (haut), M (moyen), L (bas), VL (très bas).

Enfin, l'essai PO03 a été complété avec du lisier brut de maternité auquel était ajouté de la poussière de sablage. Les concentrations de poussière de sablage utilisées dans la préparation des dix mélanges avec le lisier de maternité étaient les suivantes : 0,0, 1,7, 4,4, 8,7, 13, 17, 26, 35, 44 et 64 g_{sec}·l⁻¹. Les mélanges ont été agités pendant 1 h avant de procéder aux tests de polymères, tels que décrits pour l'essai PO01, avec les polymères cationiques LMP 9511, Zetag 7557 et Zetag 7689.

En plus des paramètres qualitatifs relatifs aux floccs, à la séparation et au surnageant, les solides totaux (ST) ont été mesurés. Le tableau qui suit expose les grilles d'évaluation qualitative des floccs, de la séparation et du surnageant.

Tableau 17 Grilles d'évaluation de la qualité des floculats, de la séparation et du surnageant

Floculats		Séparation		Surnageant	
0	Aucune floculation	0	Aucune séparation	0	Opaque
1	Très petits floes	1	Faible décantation	1	Peu clair
2	Petits floes	2	Bonne décantation	2	Clair
3	Moyens floes	3	Faible flottation	3	Très clair
4	Gros floes	4	Moyenne flottation		
5	Très gros floes	5	Excellente flottation		

2.2.1.3 Tests de flottation en colonnes

Après avoir fixé les conditions optimales de séparation, la séparation solide-liquide par flottation biologique doit être approfondie et quantifiée par des études de séparation en colonnes «COL». Ces derniers ont été complétés au mois d'août 2000.

Les essais de flottation en colonne ont été faits sur le lisier brut de maternité et sur un mélange de lisier brut de maternité et de poussière de sablage ($33 \text{ g}_{\text{sec}} \cdot \text{l}^{-1}$). Préalablement aux essais, les solutions de polymères ont été préparées comme décrit antérieurement. Les polymères retenus, Zetag 7557 et Zetag 7654, sont de la famille des floculants cationiques.

Trois essais ont été réalisés, soit la séparation du lisier brut avec le polymère Zetag 7654 (COL01), la séparation du lisier brut avec le polymère Zetag 7557 (COL02) et la séparation du mélange lisier brut et poussière de sablage avec le polymère Zetag 7654 (COL03). Les volumes de polymères ajoutés étaient de 0, 250, 500, 1 000, 1 750 et 2 500 ml pour des concentrations respectives de 0, 5, 10, 20, 35 et 50 % $\text{v} \cdot \text{v}^{-1}$. Noter que le mélange de lisier brut et de poussière de sablage a été agité mécaniquement pendant environ 10 min.

Les essais ont été réalisés dans des colonnes de PVC ayant un volume utile de 5 l. La procédure générale se résumait à remplir six colonnes de lisier brut et à ajouter le volume de polymère défini. Le volume total, incluant le volume de polymère ajouté, équivalait à 5 l. Ensuite, le lisier et le polymère ont été mélangés par cinq inversions (haut en bas et bas en

haut). Les volumes de lisier décanté ou flotté (S) et de liquide (L) étaient notés à 0, 2, 4, 8, 12, 24 et 48 h. Des échantillons pour l'analyse de la demande chimique en oxygène (DCO_t) ont été également prélevés à ces h pour l'essai COL02. Au bout de 48 h, le surnageant et le solide ont été échantillonnés pour l'analyse des paramètres physiques et chimiques de ces fractions. Avant l'échantillonnage, le solide était égoutté sur un tamis dont les ouvertures étaient de 1 mm.

Les paramètres suivis pendant les essais ont été pour le lisier brut et la fraction liquide, la demande chimique en oxygène (DCO_t), l'azote total (N_{NTK}), l'azote ammoniacal (NH_4^+), le phosphore total (P_t) et les ortho-phosphates (PO_4^{3-}), alors que pour la fraction solide, seuls les solides totaux (ST) ont été suivis.

2.2.1.4 Tests de flottation en cônes

Les essais de flottation en cônes ont été réalisés avec du lisier brut d'engraissement au mois d'août 2001. Cinq séries d'essais ont été complétés. Noter que les solutions de polymère étaient préparées comme décrit antérieurement.

De prime abord, l'essai CON01, visant à déterminer le type de polymère, a été réalisé, à quelques détails près, selon la procédure des tests de polymères explicités antérieurement. Les variations se situaient au niveau des types de polymères cationiques testés soit Zetag 7557, Zetag 7654 et LPM 9511. De plus, l'ajout de polymère, par tranche de 5 ml, différait au niveau des volumes cumulatifs qui étaient de 20, 30, 40 et 50 ml. Des évaluations qualitatives sur les floccs, la séparation et le surnageant ont été complétées pour la concentration de 50 ml ($20\% \text{ v}\cdot\text{v}^{-1}$).

Ensuite, le dosage optimal de deux polymères (Zetag 7654 et LPM 9511) a été étudié au cours de l'essai CON02. L'essai a été réalisé à l'aide de cônes Imhoff jaugés à 1 l. Les concentrations de polymère retenues ont été de 0, 16 et $25\% \text{ v}\cdot\text{v}^{-1}$. Les qualités des flocculats, de la séparation et du surnageant ainsi que les volumes de solide et de liquide ont été notés aux temps 0, 8 et 22 h. Des échantillons pour l'évaluation des solides totaux (ST) et des matières en suspension (MES) ont été prélevés à 8 et à 22 h.

Une fois le type et le dosage du polymère arrêtés, il a été possible d'étudier les effets des solides totaux (essai CON03) et de la granulométrie (essai CON04) sur la séparation du lisier d'engraissement. Les polymères utilisés ont été Zetag 7654 et LPM 9511. La concentration de polymère retenue était de 16 % v.v⁻¹. Les expériences ont toujours été complétées dans les cônes Imhoff. Pour l'essai CON03, les dilutions à l'étude étaient de 1 : 0, 1 : 1 et 1 : 2. Noter que les dilutions ont été réalisées avec l'eau du robinet. Quant à l'essai CON04, le lisier brut était préalablement tamisé aux diamètres de 0, 1 et 2 mm. L'échantillonnage s'effectuait exactement comme celui de l'essai CON02.

Finalement, l'étude du temps de rétention hydraulique optimal (essai CON05) complétait ces séries d'essais en cônes. La concentration de polymère était toujours de 16 % v.v⁻¹. Les conditions testées étaient le lisier brut tamisé à 1 mm et le lisier brut dilué 1:1. La fréquence des observations de la qualité des floculats, de la séparation et du surnageant de même que des volumes de solide et de liquide a été modifiée. Les observations ont été notées aux temps 0, 2, 4, 6, 8, 12 et 22 h. Des échantillons pour l'évaluation des solides totaux (ST) et des matières en suspension (MES) ont été prélevés à 8 et à 22 h.

2.2.1.5 Étude des gaz dégagés lors de la flottation biologique

L'étude préliminaire des gaz dégagés lors de la séparation du lisier d'engraissement par flottation biologique (GAZ01) vise à identifier la nature de certains de ces gaz et à évaluer qualitativement leur importance dans le mélange gazeux. Les gaz à l'étude se limitent à l'ammoniac (NH₃), au sulfure d'hydrogène (H₂S), au monoxyde de carbone (CO) et au dioxyde de carbone (CO₂).

Un mélange de lisier d'engraissement, préalablement décanté et tamisé, et de polymère LPM 9511 (1 g.l⁻¹), à raison d'une concentration de 16 % v.v⁻¹, a été préparé. Le mélange était contenu dans un erlenmeyer en pyrex de 4 l. Ce dernier était relié à un erlenmeyer en verre de 2 l afin de permettre la détente des gaz produits. Le montage a été étanché avec de la paraffine et le tout a été recouvert de papier d'aluminium pour empêcher la pénétration de la lumière. Le temps alloué à la séparation a été de 22 h. Les floccs, la séparation et le surnageant ont été qualifiés selon la grille d'évaluation présentée antérieurement.

Deux séries d'échantillonnage des gaz ont été complétées. La première série a été réalisée au bout de 22 h alors que la séparation de phases était achevée. La seconde série a été effectuée après avoir brisé la séparation de phases par agitation. Les échantillons gazeux ont été prélevés par une valve sur le contenant de 4 l à l'aide d'une pompe à air et des tubes de détection spécifiques à chaque gaz. Les lectures de concentration des gaz ont été faites immédiatement après l'échantillonnage.

Noter que la concentration en solides totaux du lisier a été évaluée initialement. De plus, la température de la pièce où se déroulait l'essai a été recueillie.

2.2.2 Essais de flottation en laboratoire

L'étude de la flottation en laboratoire s'est déroulée de septembre 2000 à février 2001. Les essais ont été complétés par deux étudiantes dans le cadre de leur formation respective. Les données présentées dans cette section proviennent de leurs travaux (Imbeault, 2001 ; Leblanc, 2001).

2.2.2.1 Description et fonctionnement du montage expérimental

Les essais de flottation en laboratoire ont été réalisés dans une cellule de flottation en acrylique de 23 l de volume utile. La figure 7 présente différentes vues de la cellule de flottation.

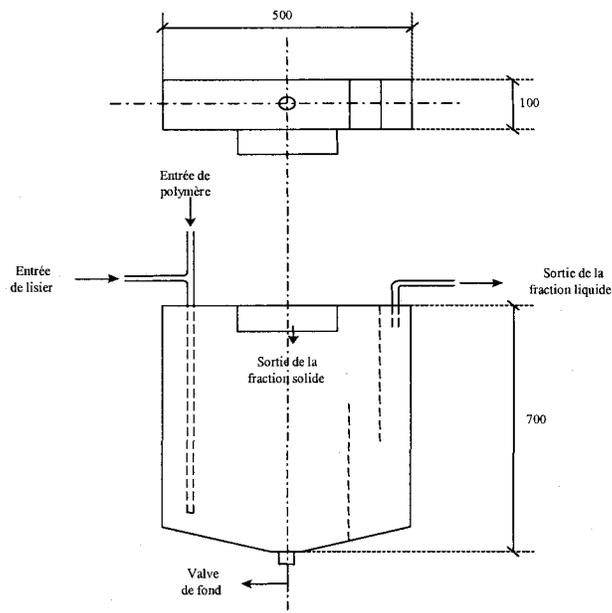


Figure 7 Vues en élévation et de dessus de la cellule de flottation utilisée au laboratoire

Les vues ne sont pas à l'échelle et les dimensions sont en millimètres. Le lisier et le polymère étaient acheminés au fond de la cellule de flottation par l'intermédiaire d'un tube. Ce dernier assurait le mélange du lisier et du polymère essentiel à la floculation. Le polymère était dissous avec de l'eau à raison de $1 \text{ g}\cdot\text{l}^{-1}$. Des chicanes amovibles, installées vers la sortie du réacteur, facilitaient la séparation des fractions solide et liquide. Le liquide recueilli dans le flottateur était pompé alors que le solide était extrait par le trop-plein prévu à cet effet.

La séparation de phases par flottation biologique des lisiers de maternité, de pouponnière et d'engraissement a été testée selon deux modes d'opération soit en mode cuvée et en continu.

2.2.2.2 *Essais en mode cuvée*

Les essais en mode cuvée «LABCU» implique que le mélange de lisier et de polymère est laissé au repos pour une période de 12 h après avoir été injecté dans le flottateur. Les

fractions solide et liquide sont recueillies manuellement. Seul le lisier de maternité a été testé pour le mode de séparation en cuvée. Le polymère utilisé était le Zetag 7557. Les pourcentages volume/volume de polymère ajoutés étaient : 9 et 10 % v.v⁻¹. Le lisier brut et les fractions solide et liquide ont été échantillonnés pour les analyses de ST, de MES, de N_{NTRK}, de NH₄⁺, de P_t, de PO₄³⁻, de DCO_t et de CO (fraction solide seulement).

2.2.2.3 Essais en mode continu

Le mode de séparation en continu consiste à injecter à débit constant du lisier et du polymère pendant une période donnée. Le mélange lisier/polymère circule en continu dans le flottateur dont l'équilibre du niveau de matériel est assuré par trop-plein et par pompage. Les essais «LABCO» sur les lisiers de maternité, de pouponnière et d'engraissement ont été réalisés pour les conditions présentées au tableau 18. Il importe de mentionner que les polymères employés étaient le Zetag 7557 pour les lisiers de maternité et de pouponnière, et le LPM 9511 pour le lisier d'engraissement.

Tableau 18 Conditions des essais en mode continu à l'échelle du laboratoire

Durée de l'essai (h)	Débit _{LB} (ml.min ⁻¹)	Débit _p (ml.min ⁻¹)	Conc. _p (% v.v ⁻¹)	TRH ¹² (h)	Intervalles d'échantillonnage (h)
LABCO01 et LABCO02					
30 (dup. 30)	70	14	17	4,6	6 (sauf la nuit)
LABCO03 et LABCO04					
48 (dup. 30)	50	10	17	6,4	6 (sauf la nuit)
LABCO05 et LABCO06					
30 (dup. 8)	50	10	17	6,4	6 (sauf la nuit) et pour le duplicata, 2 (sauf la nuit)

Le lisier brut et les fractions solide et liquide étaient échantillonnés pour fins d'analyses des paramètres suivants : ST, MES, N_{NTK} , NH_4^+ , P_t , PO_4^{3-} , DCO_t et CO (fraction solide seulement).

2.2.3 Essais de flottation à l'échelle pilote

Les essais de flottation à l'échelle pilote ont débuté en mai 2001 et, ont été complétés au mois de novembre 2001. Ces essais visent à étudier le potentiel de séparation du lisier de maternité et d'engraissement à l'aide d'un flottateur à plus grande échelle. Pour cette première mise à l'échelle, les fonctionnements en mode cuvée et en mode continu ont été étudiés.

2.2.3.1 Description et fonctionnement du montage expérimental

Le séparateur conçu pour les études à l'échelle pilote avait un volume utile de 315 l (près de quatorze fois supérieur au volume de la cellule de flottation en laboratoire). La figure 8 montre les plans du séparateur dont les dimensions sont en millimètres. Le montage expérimental opérait à l'intérieur d'une roulote de chantier dont les conditions ambiantes s'approchent de celles de l'extérieur. Le montage est présenté à la figure 9.

¹² Il importe de signifier que le temps de rétention hydraulique (TRH), correspondant au temps de séjour de l'affluent dans le flottateur, s'exprime par l'équation suivante : $TRH = V_{utile}/Q$ où V_{utile} = Volume utile du flottateur, m^3 et Q = Débit d'entrée de lisier et de polymère, $m^3 \cdot s^{-1}$.

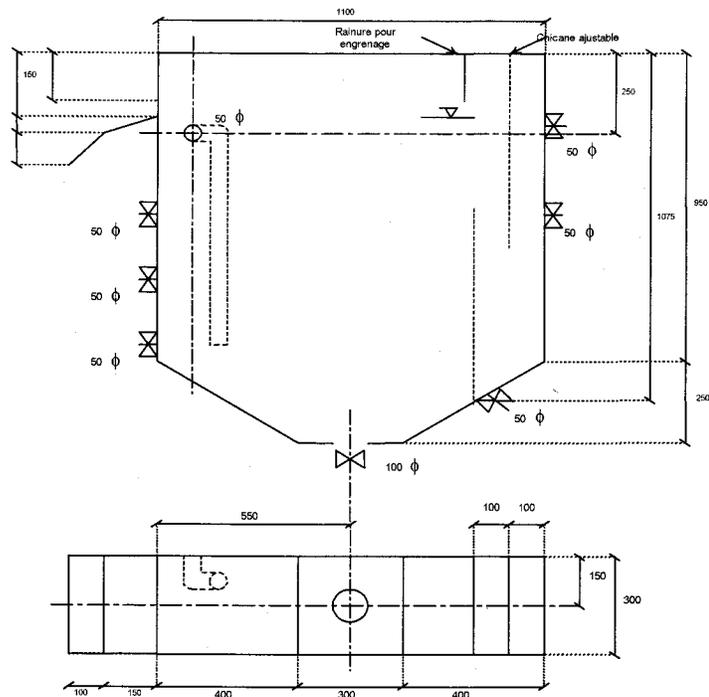
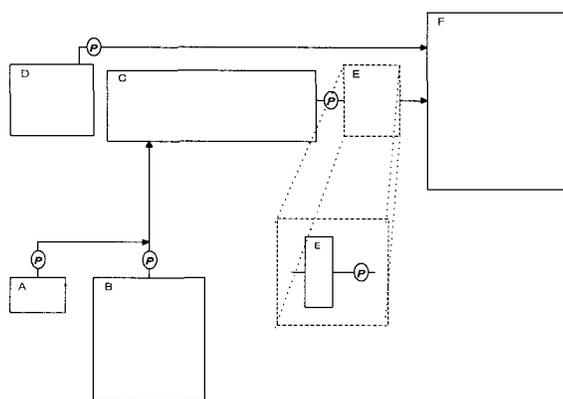


Figure 8 Vues en élévation et de dessous du séparateur à l'échelle pilote



- A. Bassin de mélange des polymères ;
- B. Réservoir de lisier brut (LB) ;
- C. Séparateur ;
- D. Réservoir de lisier solide (FS) ;
- E. Filtre de tourbe (facultatif) ;
- F. Réservoir de lisier liquide (FL) ;
- P. Pompes.

Figure 9 Vue d'ensemble du montage à l'échelle pilote

Tout comme pour la cellule de flottation en laboratoire, le lisier et le polymère ont été pompés séparément et dirigés au fond du flottateur grâce à un tube suffisamment long pour favoriser le mélange et la floculation du lisier et du polymère. Afin de faciliter la ségrégation des phases solide et liquide, des chicanes ajustables ont été installées à la sortie du séparateur. Un système de raclage mécanique, actionné à contre-courant du déplacement hydraulique de la fraction liquide, permettait de recueillir la fraction solide qui flottait à la surface du séparateur. Une pompe submersible, reposant au fond du séparateur, permettait l'évacuation des solides qui décantaient.

Le filtre de tourbe était constitué d'un mélange de tourbe blonde et de bran de scie/copeaux de bois reposant sur une couche de gravier. Noter que le bran de scie et les copeaux de bois ont été ajoutés au filtre afin d'en améliorer la conductivité hydraulique. La surface du filtre égalait à 0,0707 m². Les volumes utilisés de tourbe blonde et de bran de scie/copeaux de bois étaient respectivement de 20 l et de 16 l (proportions 1,25 : 1). La hauteur totale du filtre était d'environ 0,36 m, soit 0,31 m de tourbe blonde et de bran de scie/copeaux de bois et 0,05 m de gravier (volume total de 0,0254 m³). La compaction du mélange tourbe et bran de scie/copeaux de bois a été estimée à 39 %¹³.

2.2.3.2 *Essais en mode cuvée*

Les essais en mode cuvée ont été réalisés sur deux types de lisier : maternité et engraissement. L'essai de flottation en mode cuvée effectué avec du lisier de maternité PILCU01 visait à produire en quantité importante des sous-produits solide et liquide pouvant être épandus au champ. Ainsi, quatorze essais en cuvée ont été complétés, mais ils ont été amalgamés pour former un essai moyen en cuvée. La solution de polymère Zetag 7557, de concentration égale à 1 g·l⁻¹, a été préparée avec de l'eau du robinet. La concentration moyenne de polymère utilisée s'élevait à 17 ± 2 % v·v⁻¹. Le mélange lisier/polymère s'effectuait manuellement. La durée des essais dépendait de la rapidité de

¹³ Le pourcentage de compaction a été évalué comme suit : % compaction = (volume initial - volume final) / volume initial * 100. Dans le présent cas, % compaction = (36 000 cm³ - 21 917 cm³) / 36 000 cm³ * 100 = 39 %.

flottation du lisier et, équivalait en moyenne à 14 ± 7 h. Les fractions solide et liquide ont été accumulées dans des contenants différents pendant une période de deux semaines. Une partie de la fraction liquide a été épurée à l'aide du filtre à base de tourbe. L'échantillonnage a été effectué au bout de la période de deux semaines sur la totalité de la fraction solide recueilli qui a été préalablement bien homogénéisée. La même procédure d'échantillonnage a été suivie avec les fractions liquides non filtrée et filtrée. Quant aux échantillons de lisier brut, ils ont été prélevés après chaque nouvel approvisionnement à la ferme pour un total de quatre échantillons.

Pour ce qui est des essais de flottation en mode cuvée avec le lisier d'engraissement (PILCU02 à PILCU05), ils ont été considérés individuellement. La procédure générale consistait à mélanger du lisier brut, ayant subi préalablement une dilution ou un tamisage, avec le polymère LPM 9511 (sauf pour l'essai PILCU03 où le polymère était Zetag 7654) concentré à $1 \text{ g}\cdot\text{l}^{-1}$ dans des proportions de $16 \% \text{ v}\cdot\text{v}^{-1}$. Noter que le lisier brut décanté ou tamisé conserve la nomination de lisier brut. L'agitation requise pour la floculation a été générée manuellement. Le mélange floculé demeurait au repos pour des périodes de 11, 18, 22 et 24 h. L'échantillonnage du lisier brut et des fractions solide et liquide a été complété à même le flottateur lors de l'arrêt des essais.

Pour tous les essais «PILCU», chaque échantillon a été analysé en triplicata. Les paramètres suivis étaient les ST, les MES, le N_{NTK} , le NH_4^+ , le P_t , le PO_4^{3-} , la DCO_t et le CO (fraction solide seulement).

2.2.3.3 *Essai en mode continu*

Le fonctionnement en mode continu du flottateur a été testé avec du lisier d'engraissement (PILCO01). Le lisier brut utilisé a été préalablement décanté et tamisé et, a conservé pour la description de cet essai, la nomination de lisier brut. Il a été mélangé au polymère LPM 9511 (solution à $1 \text{ g}\cdot\text{l}^{-1}$) par un contact prolongé dans le tuyau d'amenée dans le séparateur. Le volume de polymère injecté était de $16 \% \text{ v}\cdot\text{v}^{-1}$. Le temps de rétention hydraulique s'élevait à 22 h. Les débits de lisier et de polymère étaient respectivement de $11,9 \text{ l}\cdot\text{h}^{-1}$ et de $2,3 \text{ l}\cdot\text{h}^{-1}$ auxquels s'ajoute le débit lisier/polymère injecté pour compenser la vidange de la

fraction solide décantée (estimée grossièrement à $0,5 \text{ l}\cdot\text{h}^{-1}$ ¹⁴). Les débits d'entrée totalisaient donc $14,7 \text{ l}\cdot\text{h}^{-1}$. Quant aux débits de sortie, ils correspondaient aux débits de vidange de la fraction liquide (en moyenne de $13,5 \text{ l}\cdot\text{h}^{-1}$), de la fraction solide décantée (estimée à $0,5 \text{ l}\cdot\text{h}^{-1}$) et de la fraction solide flottée (inconnue). L'essai s'échelonnait sur 36 h ¹⁵ et des échantillonnages ont été effectués à 0, 24 et 36 h sur le lisier brut, les fractions liquide et solide. Les échantillons ont été prélevés directement dans les réservoirs où étaient accumulés le lisier et les sous-produits. Chaque échantillon a été analysé en triplicata pour les paramètres suivants : ST, MES, N_{NTK} , NH_4^+ , P_t , PO_4^{3-} , DCO_t et CO (fraction solide seulement).

2.2.3.4 Suivi des performances d'un filtre à base de tourbe

Ce paragraphe décrit la procédure entourant le suivi des performances du filtre à base de tourbe utilisé pour le polissage de la fraction liquide issue des essais de flottation à l'échelle pilote et ce, tant pour le lisier de maternité que pour celui d'engraissement.

Les séquences d'opération du filtre ainsi que les débits, les charges et les temps de rétention hydraulique des fractions liquides sont présentés au tableau 19.

¹⁴ La pompe submersible a une capacité de pompage de 79 LPM (tuyauterie de 2 pouces). Elle a été actionnée pendant 2 sec à 7 reprises au cours de l'essai. Le débit moyen est donc de $0,5 \text{ l}\cdot\text{h}^{-1}$ ($79/60*2*7/36$). Noter que le volume de solide décanté extirpé était immédiatement comblé manuellement en arrêtant la vidange de la fraction liquide afin de permettre l'accumulation du mélange lisier/polymère jusqu'au volume initial dans le flottateur de 315 l.

¹⁵ La durée de 36 h exclut l'arrêt du flottateur pendant 1 h en raison d'un bris au niveau de la tuyauterie de la pompe d'approvisionnement en lisier.

Tableau 19 Détails techniques relatifs à l'opération du filtre à base de tourbe

Régime	Durée (j)	Débit (ml·min ⁻¹)	Charge (cm ³ ·cm ⁻² ·j ⁻¹)	TRH (j)
FIL01				
Intermittent	0 - 4,8	50	100	0,35
Arrêt	4,8 - 36,8	0	0,0	-
FIL02				
	36,8 - 37,0 ^a	44	90	0,40
Continu	37,0 - 37,4	30	61	0,59
	37,4 - 37,5	44	90	0,40
Arrêt	37,5 - 43,5	0	0,0	-
FIL03				
Continu	43,5 - 43,7	30	61	0,59
	43,7 - 45,4	8,3	17	2,1
Arrêt	45,4 - 90,4	0	0,0	-
FIL04				
Continu	90,4 - 91,7 ^a	25	51	0,71
	91,7 - 92,4 ^a	3	6,1	5,9

^a Il y a eu remaniement du mélange de tourbe, de bran de scie et de copeaux au début de cette période.

Les échantillons de la fraction liquide (affluent du filtre) et de la fraction liquide filtrée (effluent du filtre) ont été prélevés à la fin des essais pour le lisier de maternité et à intervalle d'environ 24 h pour les essais avec le lisier d'engraisement. Les paramètres suivis étaient : ST, MES, N_{NTK}, NH₄⁺, P_t, PO₄³⁻ et DCO_t. De surcroît, quatre échantillons pour les coliformes fécaux ont été pris au cours du dernier essai en continu de deux jours, soit en début de matinée et en fin d'après-midi.

2.3 Méthodes analytiques

Cette section énonce les méthodes employées et les appareils utilisés pour compléter les diverses analyses sur les échantillons de lisier de porc. Certaines modifications apportées aux méthodes d'analyse seront exposées.

Les mesures de pH et de POR ont été réalisées à l'aide d'un pH mètre à double canal, de marque Fisher, modèle Accumet AR25 (Fisher Scientific, Ontario, Canada) pourvu d'une électrode de pH Cole Parmer à référence interne Ag/AgCl et à double jonction de verre et d'une électrode de POR (référence Ag/AgCl) de marque Cole Parmer (Cole Parmer Instrument Company, Illinois, États-Unis). L'appareil a été étalonné avant chaque utilisation par l'emploi de solutions d'étalonnage de marque VWR (VWR Scientific Products, Pennsylvanie, États-Unis) à des valeurs de pH situées entre 4 et 7.

Les mesures de solides totaux (ST) et de matières en suspension (MES) ont été effectuées conformément aux méthodes standards de l'American Public Health Association (APHA) (1995). Toutefois, le lisier brut, très difficile à filtrer, a dû être dilué préalablement à la filtration nécessaire pour la mesure des MES.

La demande chimique en oxygène (DCO_t) a été évaluée selon la procédure stipulée par l'APHA (1995) à l'aide de tubes de réactifs HACH (0-1 500 ppm). La congélation ou la réfrigération (deux semaines) des échantillons au lieu de l'acidification constitue une dérogation à la procédure énoncée ci-haut.

L'évaluation du carbone organique (CO) de la fraction solide du lisier a été réalisée en conformité avec la méthode IRDA-AS-203-R0. Noter que les échantillons étaient préalablement séchés ou réfrigérés (deux semaines).

Les mesures des ions solubles, PO_4^{3-} et NH_4^+ , ont été complétées selon les méthodes colorimétriques Technicon™ PO4 310.2 (P) et Technicon™ NH4 310.2 (NH_4^+ -N) avant que l'appareil de dosage, en l'occurrence l'Auto-Analyser Technicon™, ne soit remplacé. Dès lors, les méthodes colorimétriques suivies ont été QuickChem no 10-115-01-1-B (P) et QuickChem no 10-107-06-2-B (N- NH_3). Il importe de mentionner que la fraction solide subit une extraction au KCl (MAPAQ-IRDA¹⁶) préalablement au dosage par colorimétrie.

¹⁶Méthode MAPAQ-IRDA : Mesurer % ST de FS, peser 10 g humide, mélanger à 100 ml de KCl 2N, agiter pendant 30 min, filtrer sur une membrane Whatman 934-AH, recueillir le filtrat. Cette méthode sert pour les ions solubles NH_4^+ et PO_4^{3-} .

Noter que certains échantillons de lisier brut et de fraction liquide ont été conservés par congélation et que la fraction solide a été réfrigérée (deux semaines) sans être acidifiée.

L'azote total Kjeldahl (N_{NTK}) et le phosphore total (P_t) ont été digérés selon la méthode no 4500 (APHA, 1995) avant d'être dosés par colorimétrie en fonction des méthodes utilisées pour les ions solubles. Prendre note que la conservation de certains échantillons a été par dessiccation (phosphore total seulement) ou par congélation.

Les mesures de la concentration des gaz NH_3 , H_2S , CO et CO_2 ont été réalisées selon les instructions d'utilisation de la pompe LP-1200 et les informations spécifiques à chaque tube de détection fournies par RAE Systems Inc.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

Ce chapitre se divise en quatre sections principales : essais de séparation, essais de flottation au laboratoire, essais de flottation à l'échelle pilote et enfin, analyse économique des coûts encourus pour le traitement du lisier par séparation par flottation biologique. Pour chaque essai, l'origine des données est explicitée et, est suivie de la présentation proprement dite des résultats. Le tout est complété par une discussion des résultats.

3.1 Essais de séparation

Comme mentionné dans le chapitre antérieur, cette section comprend l'étude de l'efficacité des boues rouges et de la poussière de sablage, les tests de polymères, les tests de flottation en colonnes et en cônes et l'étude des gaz dégagés lors de la flottation biologique.

3.1.1 Étude de l'efficacité des boues rouges et de la poussière de sablage

Avant toute chose, un bref rappel des conditions d'expérimentation sera fait. Les essais BRPS01 et BRPS02 ont été réalisés avec des boues rouges (BR) pour des plages de concentrations respectives de 0 à 4 000 mg·l⁻¹ et 0 à 80 000 mg·l⁻¹. L'essai BRPS03 a été complété avec de la poussière de sablage (PS) seule pour des concentrations de 0,0 à 160 g·l⁻¹ alors que pour l'essai BRPS04, la PS (0,0 à 160 g·l⁻¹) était additionnée de BR (0 à 4 000 mg·l⁻¹). Noter qu'aucune séparation de phases n'a été réalisée pour ces essais, les échantillons étaient directement filtrés pour la mesure des ortho-phosphates.

Le lisier brut (LB) de maternité utilisé pour ces essais avait des concentrations en solides totaux (ST) de 1,7 % et en ortho-phosphates (PO₄³⁻) de 187 mg P·l⁻¹. Noter que pour l'essai BRPS02, ces concentrations étaient respectivement de 2,3 % et de 190 mg P·l⁻¹.

Les valeurs minimale et maximale de pH sont 7,6 et 8,5. Pour le POR, malgré la grande variabilité des mesures (écart types variant de 67 % à 167 %), il est possible de reconnaître que les mesures moyennes sont près de 0 mV (entre -11 et 21 mV).

L'enlèvement du PO_4^{3-} est abordé selon qu'il est total (inclus l'effet des additifs et du brassage) ou spécifique (inclus uniquement l'effet des additifs). L'enlèvement spécifique est obtenu en soustrayant l'enlèvement moyen total du LB seul à l'enlèvement moyen de chacun des mélanges. Le tableau suivant présente les pourcentages moyens d'enlèvement de PO_4^{3-} ainsi que les valeurs minimales et maximales.

Tableau 20 Pourcentages d'enlèvement des PO_4^{3-} des essais avec les boues rouges et la poussière de sablage

Essais		Enlèvement PO_4^{3-} (%)					
		Total			Spécifique		
		Moy.	Min.	Max.	Moy.	Min.	Max.
BRPS01	LB seul	21	20	22			
	Mélanges	23	22	24	2	1	4
BRPS02	LB seul	22	20	24			
	Mélanges	29	19	52	11	-3	30
BRPS03	LB seul	21	20	22			
	Mélanges	19	16	23	-5	-5	2
BRPS04	LB seul	21	20	24			
	Mélanges	22	19	29	1	-2	8

Les résultats d'enlèvement total varient de 20 % à 24 % pour le LB seul (contrôle) alors que pour les mélanges, ils jouent entre 16 % (BRPS03) et 52 % (BRPS02). Du point de vue de l'enlèvement spécifique, il y a libération de PO_4^{3-} pour l'essai BRPS03 (enlèvement spécifique égal à -5 %) alors que pour les autres mélanges, l'enlèvement spécifique varie entre 1 % et 11 %. Noter que l'enlèvement maximal de 30 % correspond à une concentration en BR de 80 000 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ c'est à dire environ 3,5 fois la masse sèche de LB.

Bref, l'enlèvement spécifique est bien en deçà du 20 % d'enlèvement obtenu par Couillard (1983) avec des solutions synthétiques. De plus, pour les meilleures performances d'enlèvement, la quantité de BR à ajouter est très élevée. Quant à l'ajout de PS, il semble

être associé à un effet de libération de PO_4^{3-} . La conclusion à ces essais est donc que l'ajout de BR et de PS, en terme de potentiel déphosphorant, n'est pas souhaitable étant donné dans le premier cas, les quantités irréalistes à additionner pour des résultats d'enlèvement faibles et dans le second, l'augmentation en PO_4^{3-} .

3.1.2 Tests de polymères

Les résultats des tests de polymères sur le lisier de maternité sont présentés en trois temps soit ceux réalisés avec les polymères des familles anioniques, neutres et cationiques (PO01), ceux complétés avec des combinaisons de polymères (PO02), et ceux réalisés avec l'ajout de poussière de sablage (PS) avec les polymères cationiques (PO03).

La figure qui suit trace les performances de divers polymères en terme de séparation, de floculation et de surnageant. Noter que les % ST y sont également présentés.

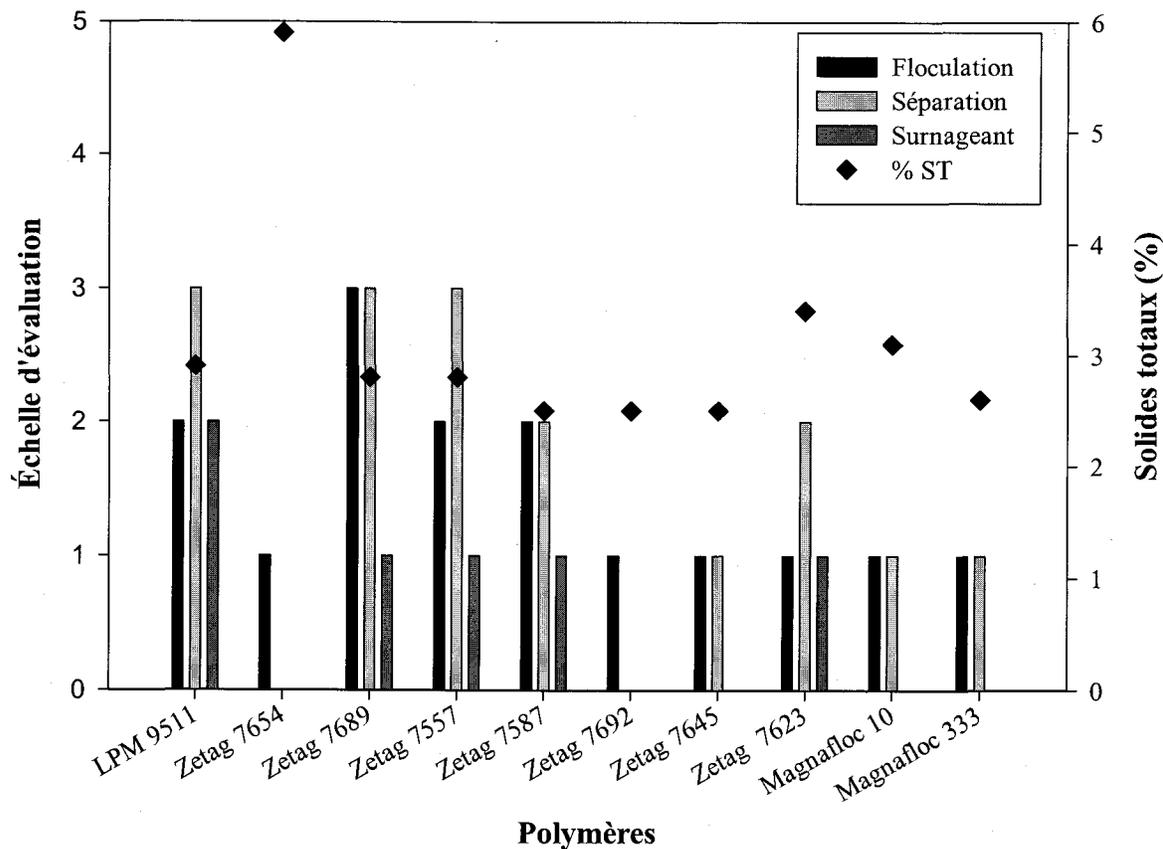


Figure 10 Performances des polymères anioniques, neutres et cationiques en terme de séparation, de floculation et de surnageant pour les lisiers bruts

Il est possible de voir que l'ajout de polymères a un effet bénéfique sur les qualités de la floculation, de la séparation et du surnageant sachant que pour les lisiers bruts (sans ajout de polymère), les pics des qualités de la floculation, de la séparation et du surnageant sont nuls.

Il ressort des résultats que les polymères les plus performants sont LPM 9511, Zetag 7689 et Zetag 7557 alors que les moins performants sont Zetag 7654, Zetag 7692, Zetag 7623, Magnafloc 10 et Magnafloc 333. Les meilleurs résultats obtenus sont des floccs moyens (3) pour la floculation, une faible flottation (3) pour la séparation et un surnageant clair (2). Certaines réserves sont toutefois apportées au sujet de la performance du polymère Zetag

7654 puisque le % ST du lisier utilisé pour ce test est presque deux fois plus grand que celui des autres tests.

En somme, les résultats de l'essai PO01 révèlent que les polymères cationiques de poids moléculaire moyen ou élevé et de densité de charges élevée à très élevée semblent offrir les meilleures performances au niveau de la qualité de la floculation, de la séparation et du surnageant.

Quant aux résultats des tests PO02 avec les combinaisons de polymères, ils ont été faits avec un lisier brut de maternité possédant une concentration en ST de 2,6 %.

Seules les qualités de la floculation et de la séparation ont été évaluées au cours de ces essais. Les performances les plus remarquables sont des floccs moyens (3) pour la floculation et une faible flottation (3) pour la séparation. Ainsi, les combinaisons de polymères ne semblent pas plus performantes que l'utilisation individuelle de polymères des tests PO01.

Enfin, les tests PO03 ont été complétés avec un lisier brut de maternité dont la concentration en ST est de 3,0 %.

Le graphique présenté ci-après est celui de la qualité de la floculation en fonction de la concentration de PS. Noter que les qualités de la séparation et du surnageant ont été évaluées, mais qu'elles ne sont pas représentées graphiquement.

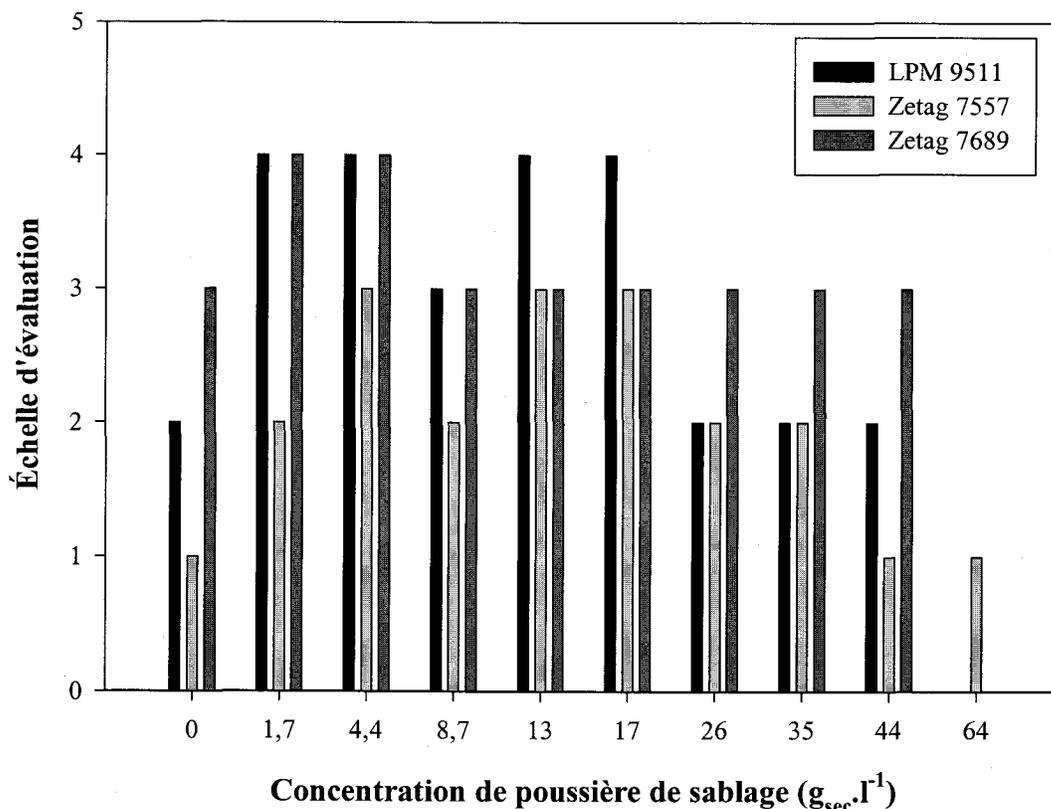


Figure 11 Qualité de la floculation pour des polymères cationiques en fonction des concentrations de poussière de sablage

L'observation du graphique montre que la qualité de la floculation semble s'améliorer avec un ajout de PS jusqu'à une concentration maximale à partir de laquelle elle tend à décroître. Cette tendance est également remarquable pour les qualités de la séparation et du surnageant.

Au niveau de la floculation, les meilleurs résultats sont la formation de gros floes (4) et ce, pour les polymères LPM 9511 et Zetag 7689. Il s'agit là d'une amélioration de la floculation puisque sans ajout de PS, les floes sont petits (2) pour le polymère LPM 9511 et moyens (3) pour le polymère Zetag 7689.

Quant à la qualité de la séparation, l'ajout de PS paraît bonifier la séparation puisqu'elle passe d'une bonne décantation (2) sans ajout de PS à une bonne flottation (4) et ce, pour les trois polymères testés.

Enfin, la qualité du surnageant tend à s'améliorer à la suite de l'ajout de PS. En effet, la qualité du surnageant passe de peu clair (1) à très clair (3) pour les polymères LPM 9511 et Zetag 7557.

De façon générale, la plage de concentrations de PS où se situent les meilleures performances en terme de floculation, de séparation et de surnageant semble être entre $0,0 \text{ g}_{\text{sec}} \cdot \text{l}^{-1}$ et $26 \text{ g}_{\text{sec}} \cdot \text{l}^{-1}$.

En comparant les meilleurs résultats de l'essai PO01 avec ceux de l'essai PO03, il apparaît que les qualités de la floculation, de la séparation et du surnageant pour l'essai PO03 sont supérieures d'une unité sur les échelles d'évaluation respectives. Il apparaît donc justifier d'approfondir les effets de l'ajout de la PS lors des essais de flottation ultérieurs.

En somme, les avantages à utiliser les polymères cationiques pour la séparation de phases du lisier de maternité semblent évidents, tout comme ceux à ajouter de la PS au lisier préalablement à l'utilisation des polymères. Tant pour l'essai PO01 que pour l'essai PO03, les performances des polymères LPM 9511, Zetag 7689 et Zetag 7557 apparaissent supérieures pour le lisier de maternité. Ces polymères cationiques ont des poids moléculaires moyens à élevés et des densités de charge élevées à très élevées. Ces résultats sont en accord avec ceux d'études citées dans la littérature à l'exception du poids moléculaire qui semble inférieur à celui trouvé par Sievers *et al.* (1994) pour un lisier dilué (poids moléculaire très élevé). Il faut signifier que ces constatations sont pour une concentration de $13 \% \text{ v} \cdot \text{v}^{-1}$ de polymère. Noter que les choix du type de polymère à employer avec les lisiers d'engraissement et de pouponnière se sont arrêtés respectivement sur le polymère LPM 9511 et sur le polymère Zetag 7557 (Imbeault, 2001 ; Leblanc, 2001).

3.1.3 Tests de flottation en colonnes

Les tests de flottation en colonnes ont permis d'obtenir des résultats qui sont présentés en trois parties distinctes soit les résultats des essais avec le polymère Zetag 7654 (COL01), avec le polymère Zetag 7557 (COL02) et avec le lisier de maternité additionné de poussière de sablage (PS) auquel est ajouté le polymère Zetag 7557 (COL03).

Avant d'aborder la présentation des résultats proprement dite, il importe de définir le ratio S/L utilisé dans cette recherche pour évaluer la séparation. Il correspond au rapport entre le volume de solides flottés ou décantés (S) et le volume de liquide (L). Lorsqu'une valeur positive lui est attribuée, le ratio S/L signifie que la séparation est par flottation. Dans le cas contraire (valeur négative), la séparation est par décantation. Plus le ratio est élevé, plus le volume de solides est important. Toutefois, un ratio supérieur à 1 s'avère peu favorable en terme d'opération d'un procédé de séparation. En effet, le volume de solides excède alors celui de liquide d'où le peu d'intérêt pour une séparation de phases. Enfin, le suivi de ce ratio à intervalles réguliers permet de déduire le temps nécessaire pour que la séparation se fasse par flottation. Cette information permet de fixer un temps de rétention hydraulique, paramètre d'opération pour les mises à l'échelle au laboratoire et au pilote.

Il est maintenant possible d'introduire les résultats de l'essai COL01. Le tableau des résultats de l'essai COL01 se trouve à l'annexe B (tableau 40). Au niveau de la séparation, le ratio S/L_{48h} indique qu'il semble y avoir séparation par flottation pour les concentrations de polymères de 20, 35 et 50 % $v \cdot v^{-1}$ (ratio S/L_{48h} positif). Le volume de solides flottés apparaît supérieur pour les concentrations de 20 et de 35 % $v \cdot v^{-1}$. Les temps nécessaires à la séparation par flottation seraient de 4 à 8 h pour les concentrations de 20 et de 50 % $v \cdot v^{-1}$ et de 8 à 12 h pour la concentration de 35 % $v \cdot v^{-1}$. Quant au pourcentage de solides totaux (% ST) de la fraction solide, il semble excéder le critère de siccité de 10 % pour les concentrations de 20 et de 35 % $v \cdot v^{-1}$. Enfin, le critère du ratio $N-NH_4^+/P_1$ (égal ou supérieur à 7) semble respecté pour les concentrations de polymère de 5 à 35 % $v \cdot v^{-1}$. De façon générale, les pourcentages d'enlèvement tendent à croître avec l'augmentation de la

concentration en polymère, sauf pour ceux du N_{NTK} qui tendent à décroître pour les concentrations de 0 à 10 % v·v⁻¹.

Les résultats de l'essai COL02, présentés à l'annexe B (tableau 41), montrent qu'il y aurait séparation par flottation pour les concentrations de polymères de 10, 20, 35 et 50 % v·v⁻¹. Le volume de solides flottés apparaît supérieur pour la concentration de 20 % v·v⁻¹. Les temps nécessaires à la séparation par flottation seraient de 4 à 8 h pour la concentration de 10 % v·v⁻¹ et de 8 à 12 h pour les concentrations de 20 à 50 % v·v⁻¹. Pour le critère de siccité de la fraction solide, il ne serait pas respecté pour toutes les concentrations. Toutefois, les fractions solides des concentrations de polymère de 10, 20 et 35 % v·v⁻¹ semblent se démarquer et leur siccité s'élève respectivement à 9,6 %, 9,5 % et 9,4 %. Quant au critère du ratio $N-NH_4^+/P_t$ (égal ou supérieur à 7), il serait respecté pour toutes les concentrations de polymère. Les concentrations de 10 et de 20 % tendent à avoir les meilleurs ratios qui sont égaux à 9.

De façon générale, les pourcentages d'enlèvement tendent à croître avec l'augmentation de la concentration en polymère.

Les résultats de l'essai COL03, présentés à l'annexe B (tableau 42), indiquent qu'il y aurait séparation par flottation pour les concentrations de polymères de 20 et 35 % v·v⁻¹. Le volume de solides flottés semble supérieur pour la concentration de 20 % v·v⁻¹. Les temps nécessaires à la séparation par flottation seraient de 8 à 24 h pour la concentration de 20 % v·v⁻¹ et de 24 à 48 h pour les concentrations de 35 % v·v⁻¹. Le pourcentage de solides totaux de la fraction solide serait égal ou supérieur à 10 % pour les concentrations de 0 à 20 % v·v⁻¹. Les concentrations de polymère de 0 et de 20 % v·v⁻¹ tendent à offrir les meilleures siccités qui sont respectivement de 11,4 et 11,3 % ST. Pour la fraction liquide, le critère du ratio $N-NH_4^+/P_t$ (égal ou supérieur à 7) serait respecté pour les concentrations de polymère de 0, 5, 20 et 50 % v·v⁻¹. La concentration de 50 % v·v⁻¹ de polymère semble donner le meilleur ratio qui équivaut à 10 alors que les ratios des autres concentrations n'égalent que 7. De façon générale, les pourcentages d'enlèvement tendent à croître avec l'augmentation

de la concentration en polymère, sauf pour le PO_4^{3-} entre les concentrations de polymère de 0 à 10 % v.v⁻¹.

En somme, pour tous les essais, l'ajout de polymère semble justifié pour permettre le respect des critères de siccité et du ratio $\text{N-NH}_4^+/\text{P}_t$, ainsi que pour améliorer les performances d'enlèvement. Généralement, la concentration de 20 % v.v⁻¹ de polymère offre les meilleurs rendements tant au niveau du respect des critères que des performances d'enlèvement pour tous les essais, à l'exception de l'essai COL02 où une concentration de polymère de 10 % v.v⁻¹ présente des rendements assez comparables. Le tableau ci-dessous présente une synthèse de meilleurs résultats des essais COL01, COL02 et COL03. Prendre note que tous ces résultats sont pour une concentration de polymère de 20 % v.v⁻¹.

Tableau 21 Synthèse des meilleurs résultats des essais de flottation en colonnes

	COL01	COL02	COL03
Polymère	Zetag 7654	Zetag 7557	Zetag 7557
PS (g _{sec} ·l ⁻¹)	0,0	0,0	33
Ratio S/L _{48h}	0,5	0,3	5,6
T _{flottation} (h)	4-8	8-12	8-24
Siccité (% ST)	12,0	9,5	11,3
Ratio $\text{N-NH}_4^+/\text{P}_t$	9	9	7

Considérant que la siccité, le ratio $\text{N-NH}_4^+/\text{P}_t$, le temps de flottation et le ratio S/L_{48h} , il apparaît que l'essai COL01 offre de bons résultats pour une concentration optimale de 20 % v.v⁻¹ de polymère. Il est suivi de l'essai COL02, puis de l'essai COL03.

Pour les critères de siccité et de ratio $\text{N-NH}_4^+/\text{P}_t$, le polymère Zetag 7654 surpasserait donc le polymère Zetag 7557. Il ne faut cependant pas perdre de vue le critère économique. Étant

donné que le polymère Zetag 7654 est plus dispendieux¹⁷ que le Zetag 7557 (en raison de son caractère ionique très élevé), le choix du polymère s'arrête sur le Zetag 7557 pour le lisier de maternité.

3.1.4 Tests de flottation en cônes

Les tests de flottation en cônes ont été réalisés sur le lisier brut d'engraissement. Les essais ont été réalisés avec deux échantillonnages de lisier différents. Cinq séries d'essais ont été complétées soit CON01, CON02, CON03, CON04 et CON05.

De prime abord, l'essai CON01 a permis de déterminer que le polymère Zetag 7654 était le plus performant pour le premier échantillonnage de lisier, alors que le polymère LPM 9511 s'est avéré le meilleur pour le second échantillonnage. Les caractéristiques initiales du lisier brut d'engraissement (LB), en terme de concentrations en solides totaux (ST) et en matières en suspension (MES), sont présentées au tableau suivant.

Tableau 22 Caractéristiques des lisiers utilisés pour les tests de flottation en cônes

Caractéristiques du LB	Zetag 7654	LPM 9511
ST (%)	4,2	1,9
MES (mg·l ⁻¹)	18 900	9 450

Ensuite, afin de synthétiser les multiples résultats des essais CON02 à CON05, deux indices composés ont été créés spécialement pour les besoins de cette recherche : l'indice composé de la qualité de la flottation (ICQF) et l'indice composé de la mesure de la flottation (ICMF).

¹⁷ Les prix des polymères sont présentés à la section 3.4 de l'analyse économique. Il faut cependant savoir qu'au moment des essais à l'été 2000, les prix pour le Zetag 7654 était estimé à 8,00 \$·kg⁻¹ d'où la décision de l'exclure pour des raisons économiques.

L'indice ICQF se définit comme la somme des valeurs des cotes qui ont été attribuées aux qualités de la floculation (F), de la séparation (Se) et du surnageant (Su).

Équation 2 Formule de l'indice composé de la qualité de la flottation

$$ICQF = F + Se + Su$$

Noter que les coefficients de pondération égalent à 1. Le tableau qui suit présente la distribution et les valeurs de ces cotes.

Tableau 23 Distribution et valeurs des cotes pour le calcul de l'indice composé de la qualité de la flottation

Paramètres	Divisions des cotes	Cotes	Valeurs des cotes
Floculation (F)	$0 \leq F \leq 2$	Faible (F)	1
	$F = 3$	Moyen (M)	2
	$4 \leq F \leq 5$	Bon (B)	3
Séparation (Se)	$0 \leq Se \leq 2$	Faible (F)	1
	$Se = 3$	Moyen (M)	2
	$4 \leq Se \leq 5$	Bon (B)	3
Surnageant (Su)	$0 \leq Su \leq 1$	Faible (F)	1
	$Su = 2$	Moyen (M)	2
	$3 \leq Su \leq 4$	Bon (B)	3
ICQF	$3 \leq ICQF \leq 4$	Faible (F)	
	$5 \leq ICQF \leq 7$	Moyen (M)	Ne s'applique pas.
	$8 \leq ICQF \leq 9$	Bon (B)	

Quant à l'indice ICMF, il correspond à la somme des valeurs des cotes attribuées pour le ratio S/L, la concentration en ST de la fraction solide et l'enlèvement des matières en suspension (E_{MES}) de la fraction liquide. L'enlèvement des matières en suspension a été

préférée à l'enlèvement des solides totaux puisque le procédé de séparation agit principalement sur les matières en suspension.

Équation 3 Formule de l'indice composé de la mesure de la flottation

$$ICMF = \frac{S}{L} + ST + E_{MES}$$

Noter que les coefficients de pondération égalent à 1. De façon similaire, la distribution et les valeurs des cotes de l'indice ICMF sont exposées au tableau ci-après.

Tableau 24 Distribution et valeurs des cotes pour le calcul de l'indice composé de la mesure de la flottation

Paramètres	Divisions des cotes	Cotes	Valeurs des cotes
Ratio S/L	$S/L \leq 0$ ou $S/L > 1$	Faible (F)	1
	$0,5 < S/L \leq 1$	Moyen (M)	2
	$0 < S/L \leq 0,5$	Bon (B)	3
ST	$0 \% \leq ST \leq 4 \%$	Faible (F)	1
	$5 \% \leq ST \leq 9 \%$	Moyen (M)	2
	$ST \geq 10 \%$	Bon (B)	3
E_{MES}	$0 \% \leq E_{MES} \leq 50 \%$	Faible (F)	1
	$50 \% \leq E_{MES} \leq 85 \%$	Moyen (M)	2
	$85 \% \leq E_{MES} \leq 100 \%$	Bon (B)	3
ICMF	$3 \leq ICMF \leq 4$	Faible (F)	
	$5 \leq ICMF \leq 7$	Moyen (M)	Ne s'applique pas.
	$8 \leq ICMF \leq 9$	Bon (B)	

Les indices composés vont faciliter l'analyse des résultats des essais CON02 à CON05 qui sont présentés au tableau 25. De plus, la légende des couleurs utilisées dans le tableau pour l'interprétation des résultats est :

Aucune flottation

Faible flottation

Moyenne flottation

Bonne flottation

Prendre note que les cases vides (sans lettre et sans couleur) signifient que les indices n'ont pas pu être calculés.

Tableau 25 Synthèse des résultats des essais de flottation en cônes

Essais	Conditions	Zetag 7654		LPM 9511	
		ICQF	ICMF	ICQF	ICMF
CON02	0 % v.v ⁻¹	A	A	A	A
	16 % v.v ⁻¹	M	M	M	M
	25 % v.v ⁻¹	M	M	B	
CON03	1:0	F		M	
	1:1	M	B	A	A
	1:2	B	B	A	A
CON04	0 mm	M		M	B
	1 mm	M	M	M	B
	2 mm	M	M	A	A
CON05	LB	M		M	B
	1 mm	M	B	A	A
	1:1	A	A	M	B

Quelques remarques s'imposent avant de procéder à l'analyse des résultats. Il est possible d'observer qu'il y a une correspondance parfaite entre les évaluations qualitatives (ICQF) et les évaluations quantitatives (ICMF) dans la moitié des cas (six cas sur douze). Les évaluations qualitatives (ICQF) sont généralement inférieures aux évaluations quantitatives (ICMF). Ces indices doivent donc être utilisés en complémentarité pour l'interprétation des résultats. De plus, les comparaisons entre les performances du polymère Zetag 7654 et

celles du polymère LPM 9511 sont impossibles en raison de la différence d'échantillonnage du lisier brut d'engraissement. Enfin, il importe de mentionner que les résultats du tableau 25 sont ceux recueillis au temps de 22 h.

Il est maintenant temps de passer à l'analyse des résultats. L'essai CON02 suggère que l'ajout de polymère favorise la séparation par flottation. Bien qu'il semble subsister une légère amélioration de la flottation en augmentant la concentration de polymère, il apparaît que cette amélioration est limitée entre les concentrations de polymère de 16 et de 25 % v.v⁻¹. Cette constatation, en plus des considérations économiques, a guidé le choix de la concentration de polymère de 16 % v.v⁻¹ pour les essais CON03, CON04 et CON05.

Pour ce qui est des effets de la dilution du lisier (essai CON03), il semble qu'elle accroît la flottation dans le cas du Zetag 7654 alors qu'elle semble néfaste à la flottation dans le cas du LPM 9511.

Quant à l'essai CON04, il apparaît que le tamisage semble avoir peu d'effets sur la flottation puisqu'elle est moyenne dans tous les cas pour le Zetag 7654. Par contre, dans le cas du LPM 9511, il semble qu'un tamisage à 2 mm ne favorise pas la flottation alors qu'un tamisage à 1 mm tend à offrir des performances de flottation comparables à celles sans tamisage.

Enfin, l'essai CON05, synthèse des conditions de dilution 1:1 et de tamisage à 1 mm, démontre dans un premier temps qu'il est difficile de répéter les mêmes performances de flottation pour un même échantillonnage de lisier et un même polymère. Seule donnée constante, la flottation du LB semble moyenne pour le polymère Zetag 7654 alors que pour le polymère LPM 9511, elle apparaît être moyenne à bonne.

Lors de l'essai CON05, il a été possible de déduire approximativement le temps nécessaire à la flottation de la fraction solide. Ainsi, pour le LB, le temps de flottation se situe entre 6 et 8 h tant pour l'utilisation du polymère Zetag 7654 que pour le polymère LPM 9511. Quant au LB tamisé à 1 mm, le temps de flottation se situe entre 8 et 12 h pour le polymère Zetag 7654. Noter qu'il n'y a pas eu de flottation pour cet essai avec le polymère LPM

9511. Enfin, le temps de flottation pour un lisier brut dilué 1:1 se trouve entre 12 et 22 h avec le polymère LPM 9511. Aucune flottation des solides n'a été observée avec le polymère Zetag 7654.

En conclusion, bien que le choix du polymère par rapport aux performances de flottation soit impossible, il ressort qu'au niveau économique, le polymère LPM 9511 est préféré puisqu'il est moins onéreux¹⁸ que le polymère Zetag 7654. La concentration optimale apparaît être de 16 % v·v⁻¹. Il est difficile de conclure sur l'incidence des ST puisque les résultats avec le lisier dilué sont variables (ou absents). Quant à l'influence de la granulométrie du lisier sur la flottation, il semble qu'elle ait peu d'effets.

Enfin, le meilleur temps de flottation, c'est à dire entre 6 et 8 h, a été obtenu avec le LB et ce, pour le polymère Zetag 7654 et le polymère LPM 9511.

3.1.5 Étude préliminaire des gaz dégagés lors de la flottation biologique

Pour compléter les essais de séparation, il est apparu nécessaire d'étudier les gaz dégagés lors de la flottation biologique à des fins qualitatives.

La détection des gaz a été réalisée avec du lisier d'engraissement. La concentration moyenne en solides totaux (ST) du lisier était de 2,3 %. Le temps alloué à la séparation par flottation a été de 22 h. Les qualités de la floculation, de la séparation et du surnageant seraient respectivement : gros floes (4), excellente flottation (5) et surnageant très clair (3). La température ambiante s'élevait à 25°C. La pression et l'humidité correspondaient à celles du milieu fermé et elles n'ont pas été évaluées. La figure qui suit témoigne de la prédominance de certains gaz sur les autres. Les pics du CO₂ ont été volontairement tracés ainsi puisque les concentrations excèdent 1,0 %.

¹⁸ Les prix des polymères sont présentés à la section 3.4 de l'analyse économique. Il faut cependant savoir qu'au moment des essais à l'été 2000, les prix pour le Zetag 7654 était estimé à 8,00 \$·kg⁻¹ d'où la décision de l'exclure pour des raisons économiques.

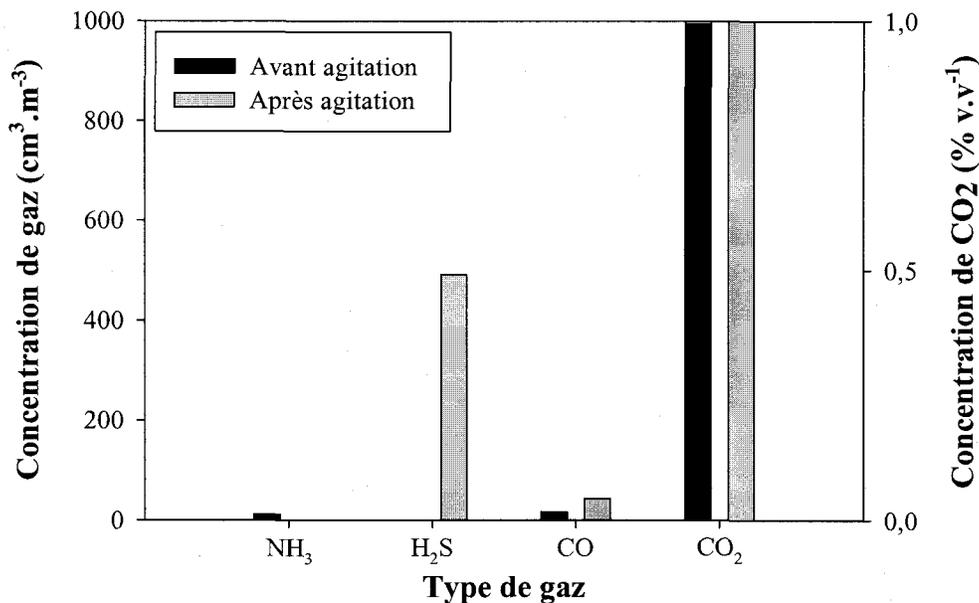


Figure 12 Concentrations de NH₃, de H₂S, de CO et de CO₂ mesurées lors d'un essai de flottation

Avant le bris de la couche de solides flottés, les gaz détectés sont l'ammoniac (NH₃), le monoxyde de carbone (CO) et le dioxyde de carbone (CO₂). Une fois la couche de solides flottés brisée, les gaz détectables sont le sulfure d'hydrogène (H₂S), le monoxyde de carbone (CO) et le dioxyde de carbone (CO₂).

De prime abord, le CO₂ apparaît être le gaz dominant rejeté lors de la flottation biologique et ce, avant et après le bris de la couche de solides flottés. Une étude de Muehling (1970) démontre en effet que 40 % du gaz issu de fosses à lisier correspond à du CO₂. Pour les lisiers de porc, Ni *et al.* (1999) reconnaissent deux sources de CO₂ : l'hydrolyse de l'urée (Aarnink *et al.*, 1995) et la digestion anaérobie des composés organiques du lisier.

Ensuite, avant le bris de la couche de solides flottés, il est possible de déceler du NH₃ et du CO qui apparaissent en très faibles proportions par rapport au CO₂. Le NH₃ peut être

générer lors de la décomposition des acides aminés par fermentation (Zhu et Jacobson, 1999) et lors de l'hydrolyse de l'urée (Spoelstra, 1980). Il peut également provenir de la dissociation du NH_4^+ du lisier (Barrington et Moreno, 1995). Quant au CO , il peut être associé à un processus de digestion anaérobie du lisier puisqu'il constitue, selon Hickey et Switzenbaum (1991), un bon indicateur pour le suivi du fonctionnement de digesteurs anaérobies. Noter que le CO est un gaz toxique.

Enfin, les gaz détectés après le bris de la couche de solides flottés sont en ordre croissant d'importance : le CO , le H_2S et le CO_2 . Les origines du CO_2 et du CO ont été discutées antérieurement. Pour ce qui est du H_2S , il pourrait être produit biologiquement lors de la réduction des sulfates (provenant généralement de l'eau utilisée dans les porcheries) et de la décomposition en milieu anaérobie de composés organiques (Arogo *et al.*, 2000). Autre point à mentionner relativement au H_2S , il a été détecté seulement après le bris de la couche de solides flottés par agitation. Donham (2000) mentionne à cet effet que le H_2S est emmagasiné dans le lisier (à la manière du gaz carbonique d'une boisson gazeuse) et qu'il est libéré lorsque celui-ci est agité. Prendre note que le H_2S est un gaz toxique.

En somme, la présence de ces gaz est caractéristique des activités microbiologiques dans un milieu anaérobie comme le lisier de porc. Noter qu'il serait également possible de retrouver du CH_4 puisque les pertes les plus importantes en CH_4 pour l'industrie porcine proviennent de l'entreposage des lisiers (Drolet et Gilbert, 2000). Toutefois, pour des raisons de disponibilité d'équipements, ce gaz n'a pas pu être mesuré. Il sera l'objet d'études ultérieures.

3.2 Essais de flottation en laboratoire

Les essais de séparation étant concluants, il est tout à fait justifié de procéder aux essais de flottation à l'aide d'un prototype de laboratoire. Les résultats des essais de flottation en laboratoire proviennent des travaux de stages de Imbeault (2001) et Leblanc (2001).

3.2.1 Essais en mode cuvée

Les essais en mode cuvée, LABCU01 et LABCU02, ont permis de séparer par flottation biologique le lisier de porc de maternité en une fraction liquide (FL) et une fraction solide (FS).

Dans un premier temps, quelques différences notoires sont à remarquer entre les concentrations des lisiers bruts (LB) utilisés. En fait, les concentrations des MES, du P_t et du PO_4^{3-} du lisier de l'essai LABCU02 représentent respectivement 42 %, 46 % et 46 % des concentrations du lisier de l'essai LABCU01. Noter que ces concentrations sont détaillées à l'annexe C (tableau 43).

Dans un second temps, les caractéristiques des FL produites, exprimées en fonction du critère $N-NH_4^+/P_t$ et des pourcentages d'enlèvement des solides, des nutriments et de la DCO_t , sont montrées au tableau ci-dessous. Les valeurs entre parenthèses pour le ratio $N-NH_4^+/P_t$ représentent celles des LB avant la séparation par flottation. Un tableau à l'annexe C présentent les concentrations en solides, en nutriments et en DCO_t des FL (tableau 43).

Tableau 26 Caractéristiques des fractions liquides (FL) générées lors des essais de flottation en laboratoire en mode cuvée ; lisier de maternité ; polymère Zetag 7557

Paramètres	LABCU01	LABCU02
$N-NH_4^+/P_t$	9 (1)	8 (4)
ST (% Enl.)	74	77
MES (% Enl.)	97	86
N_{NTR} (% Enl.)	50	22
P_t (% Enl.)	88	59
NH_4^+ (% Enl.)	23	4
PO_4^{3-} (% Enl.)	85	51
DCO_t (% Enl.)	75	46

Les résultats des FL montrent que le critère du ratio $N-NH_4^+/P_t$ supérieur ou égal à 7 est vérifié dans les deux cas. En comparant les ratios $N-NH_4^+/P_t$ des LB avec ceux des FL, il est possible de constater que la séparation par flottation biologique tend à hausser ce ratio.

Quant aux performances d'enlèvement en solides, en nutriments et en DCO_t , elles semblent différer pour les deux essais. En fait, les pourcentages d'enlèvement de l'essai LABCU02 semblent inférieurs pour tous les paramètres à l'exception des ST.

Les pourcentages d'enlèvement maximaux sont : ST, 77 % ; MES, 97 % ; N_{NTK} , 50 % ; P_t , 88 % ; NH_4^+ , 23 % ; PO_4^{3-} , 85 % ; DCO_t , 75 %.

Dans un troisième temps, les FS recueillies au cours de ces essais possèdent les caractéristiques exposées au tableau suivant. Les concentrations en nutriments et en carbone des FS sont présentées à l'annexe C (tableau 44).

Tableau 27 Caractéristiques des fractions solides (FS) générées lors des essais de flottation en laboratoire en mode cuvée ; lisier de maternité ; polymère Zetag 7557

Paramètres	LABCU01	LABCU02
ST (%)	7,5	9,3
C/N	4	4

Ainsi, le critère de siccité de 10 % ST n'est pas respecté pour les deux essais quoique le pourcentage des ST soit supérieur pour l'essai LABCU02. Pour ce qui est du ratio C/N, il permet de juger du potentiel de compostage de la FS. Il équivaut à 4 pour les deux essais ce qui est inférieur au ratio C/N de 30 à 35 suggéré pour le compostage.

Dans l'ensemble, il apparaît que la flottation du lisier de maternité en mode cuvée est reproductible pour des lisiers dont les caractéristiques diffèrent. Les FL obtenues répondent au critère $N-NH_4^+/P_t$. Pour ce qui est des FS, le critère de siccité n'est pas respecté.

3.2.2 Essais en mode continu

Le passage d'un mode de fonctionnement en cuvée vers un mode de fonctionnement en continu s'est avéré réalisable puisqu'il a été possible de séparer des lisiers de porc de maternité (essais LABCO01 et LABCO02), de pouponnière (essais LABCO03 et LABCO04) et d'engraissement (essais LABCO05 et LABCO06).

Le tableau des concentrations moyennes des lisiers bruts (LB) est présenté à l'annexe C (tableau 45). Noter que le LB d'engraissement LABCO06 a été dilué selon la proportion LB : EAU égale à 1:1.

3.2.2.1 Performances de la séparation des lisiers de maternité, de pouponnière et d'engraissement

L'étude des caractéristiques des fractions liquides (FL) générées permettra de connaître l'efficacité de la séparation des lisiers bruts (LB). Le tableau qui suit expose les ratios moyens $N-NH_4^+/P_t$ et les pourcentages d'enlèvements moyens des FL, calculés à partir des moyennes des concentrations mesurées à intervalles réguliers. Les valeurs entre parenthèses pour les ratios $N-NH_4^+/P_t$ représentent ceux des LB avant la séparation par flottation. Les détails des concentrations en solides, en nutriments et en DCO_t des fractions liquides sont montrés à l'annexe C (tableau 46).

Tableau 28 Caractéristiques moyennes des fractions liquides (FL) générées lors des essais de flottation en laboratoire en mode continu

Paramètres	Lisier de maternité		Lisier de pouponnière		Lisier d'engraissement	
	Polymère Zetag 7557		Polymère Zetag 7557		Polymère LPM 9511	
	LABCO01	LABCO02	LABCO03	LABCO04	LABCO05	LABCO06
N-NH ₄ ⁺ /P _t	8 (4)	10	10 (3)	11 (2)	22 (2)	19 (4)
ST (% Enl.)	67	81	78	76	76	67
MES (% Enl.)	88	96	95	96	94	89
N _{NTK} (% Enl.)	24	45	26	39	35	29
P _t (% Enl.)	60	85	77	80	86	83
NH ₄ ⁺ (% Enl.)	8	24	13	12	-31	17
PO ₄ ³⁻ (% Enl.)	55	81	10	8	-38	12
DCO _t (% Enl.)	49	74	68	65	68	57

À la lumière de ces résultats, il apparaît d'une part que le procédé de traitement par séparation du lisier hausse les ratios N-NH₄⁺/P_t des FL par rapport aux ratios des LB à un point tel que toutes les FL produites répondent au critère du ratio azote ammoniacal/phosphore total (égal ou supérieur à 7). Les ratios obtenus pour les FL issues du lisier d'engraissement, lors des essais LABCO05 et LABCO06, sont particulièrement remarquables de par leur ampleur respective de 22 et de 19.

Il est également possible de juger des performances d'enlèvement du procédé de traitement par séparation en regardant les pourcentages d'enlèvement moyens des solides, des nutriments et de la DCO_t des FL. Ainsi, pour les lisiers de maternité, il semble que les performances d'enlèvement de l'essai LABCO01 soient moindres par rapport à ceux de l'essai LABCO02. Les pourcentages d'enlèvement maximaux sont : ST, 81 % ; MES, 96 % ; N_{NTK}, 45 % ; NH₄⁺, 24 % ; P_t, 85 % ; PO₄³⁻, 81 % ; DCO_t, 74 %.

Pour les lisiers de pouponnière, les performances d'enlèvement semblent comparables pour les deux essais LABCO03 et LABCO04. Les pourcentages d'enlèvement maximaux sont : ST, 76 % ; MES, 96 % ; N_{NTK}, 39 % ; NH₄⁺, 13 % ; P_t, 80 % ; PO₄³⁻, 10 % ; DCO_t, 68 %.

Enfin, pour les lisiers d'engraissement, les performances d'enlèvement tendent à être légèrement meilleures pour l'essai LABCO05, à l'exception des paramètres solubles, NH_4^+ et PO_4^{3-} , pour lesquels il semble y avoir une augmentation de la concentration. Ces hausses de concentrations, observables uniquement pour l'essai LABCO05, s'élèvent respectivement à 31 et 38 %. Ces augmentations pourraient être liées soit à la représentativité des échantillons (prélèvement, conservation, analyse en laboratoire) ou bien, à des transformations associées au LB et au processus de séparation par flottation biologique. Aucun élément ne permet présentement de favoriser une hypothèse par rapport à l'autre. Toutefois, Kirchmann et Witter (1992) stipulent qu'il y a augmentation de la concentration en NH_4^+ parallèlement à la diminution de l'azote organique lors de la décomposition anaérobie des déjections porcines. Pour ce qui est de l'accroissement de la concentration en PO_4^{3-} , elle pourrait être d'origine biologique (libération de polyphosphates lors de la phase anaérobie de la déphosphatation biologique) (Blais et Tyagi, 2000). En dépit des pourcentages d'enlèvement négatifs de l'essai LABCO05, les pourcentages d'enlèvement maximaux sont : ST, 76 % ; MES, 94 % ; N_{NTK} , 35 % ; NH_4^+ , 17 % ; P_t , 86 % ; PO_4^{3-} , 12 % ; DCO_t , 68 %.

Quant aux FS, leurs caractéristiques sont présentées dans le tableau qui suit. Un tableau se trouvant à l'annexe C (tableau 47) expose exhaustivement les moyennes des concentrations de FS.

Tableau 29 Caractéristiques moyennes des fractions solides (FS) générées lors des essais de flottation en laboratoire en mode continu

Paramètres	Lisier de maternité		Lisier de pouponnière		Lisier d'engraissement	
	Polymère Zetag 7557		Polymère Zetag 7557		Polymère LPM 9511	
	LABCO01	LABCO02	LABCO03	LABCO04	LABCO05	LABCO06
ST (%)	9,3 ± 1,3	10,3 ± 2,2	13,0 ± 3,2	9,3 ± 1,5	11,1 ± 1,2	10,3 ± 0,9
C/N	5 ± 1	6 ± 1	7 ± 1	5 ± 1	5 ± 1	5 ± 0

Il importe d'abord de s'interroger sur le respect du critère de siccité de 10 % ST. Il apparaît, en prenant en compte les écarts types, que toutes les FS semblent avoir une siccité

supérieure à 10 % ST. Encore une fois, les ratios C/N apparaissent faibles comparativement à ceux requis pour le compostage (C/N compris entre 30 et 35). Noter que l'apport en N_{NTK} du polymère¹⁹ est négligeable (entre 1 et 2 %). (Voir les calculs en bas du tableau 47 à l'annexe C.)

3.2.2.2 *Stabilité des performances de séparation dans le temps*

Après s'être arrêté aux FL et aux FS, il est primordial de vérifier que le fonctionnement du flottateur en mode continu est stable dans le temps. Une telle stabilité est garante de la qualité des sous-produits au point de vue notamment de la réponse aux critères du ratio azote ammoniacal/phosphore total de la FL et de la siccité de la FS.

Pour ce faire, des courbes ont été tracées afin de présenter les variations des concentrations des ST, des MES et de la DCO_t du LB et de la FL associée à chaque type de lisier en fonction du temps de fonctionnement (figures 12, 14 et 16). Il en est de même pour les concentrations en nutriments (figures 13, 15 et 17). Noter que ces graphiques proviennent des essais avec le lisier de maternité (LABCO01), le lisier de pouponnière (LABCO03) et le lisier d'engraissement (LABCO05). Le choix de ces essais est basé sur le nombre de cycles complétés qui est fonction du ratio de la durée totale de l'essai par rapport au temps de rétention hydraulique fixé. Plus le nombre de cycles est élevé, plus le système est considéré avoir atteint un état d'équilibre. Les nombres de cycles respectifs pour les essais LABCO01, LABCO03 et LABCO05 sont 6,5, 3,8 et 4,7.

En complément à l'analyse des graphiques, des coefficients de variation ont été calculés pour toutes les concentrations moyennes des LB, des FL et des FS.

Ces coefficients de variation témoignant de la variabilité des concentrations dans le temps sont présentés dans des tableaux à l'annexe C (tableaux 48, 49 et 50).

¹⁹ L'apport en N_{NTK} du polymère est considéré comme infime pour tous les essais à l'échelle pilote puisque les concentrations de polymères de 17 % v.v⁻¹, utilisées pour les essais à l'échelle du laboratoire, sont les plus élevées de toute la recherche.

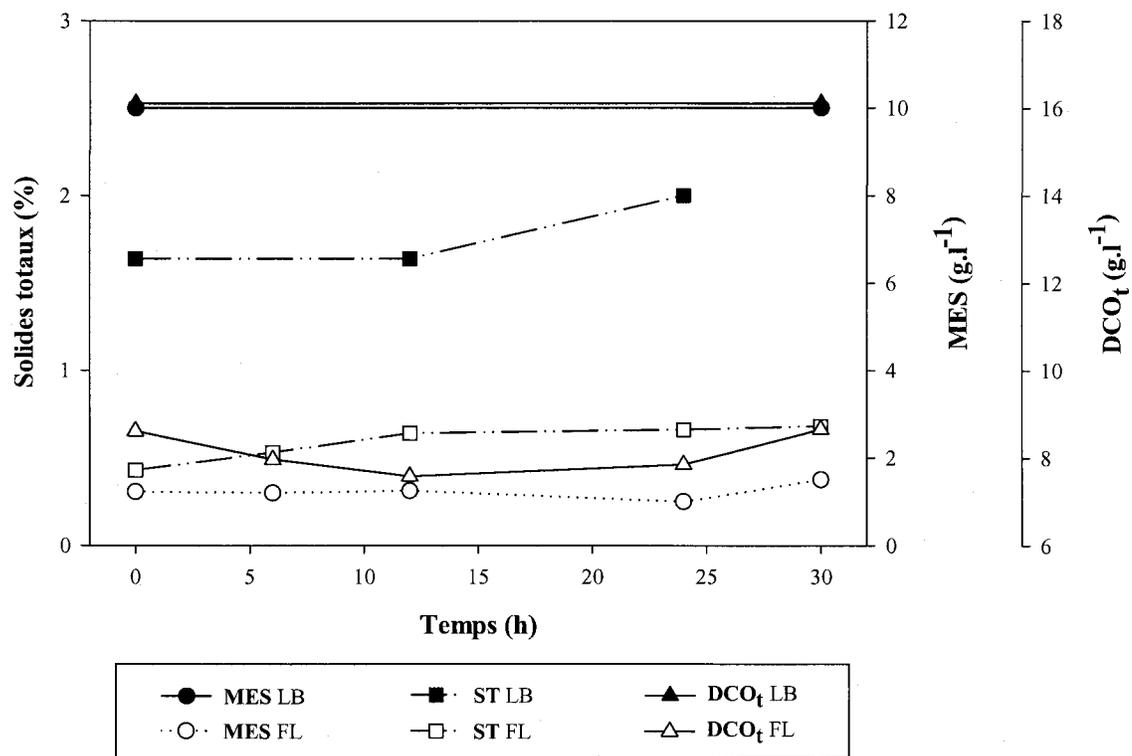


Figure 13 Variations des solides et de la DCO_t du LB et de la FL en fonction du temps pour l'essai LABCO01 ; lisier de maternité ; TRH = 4,6 h

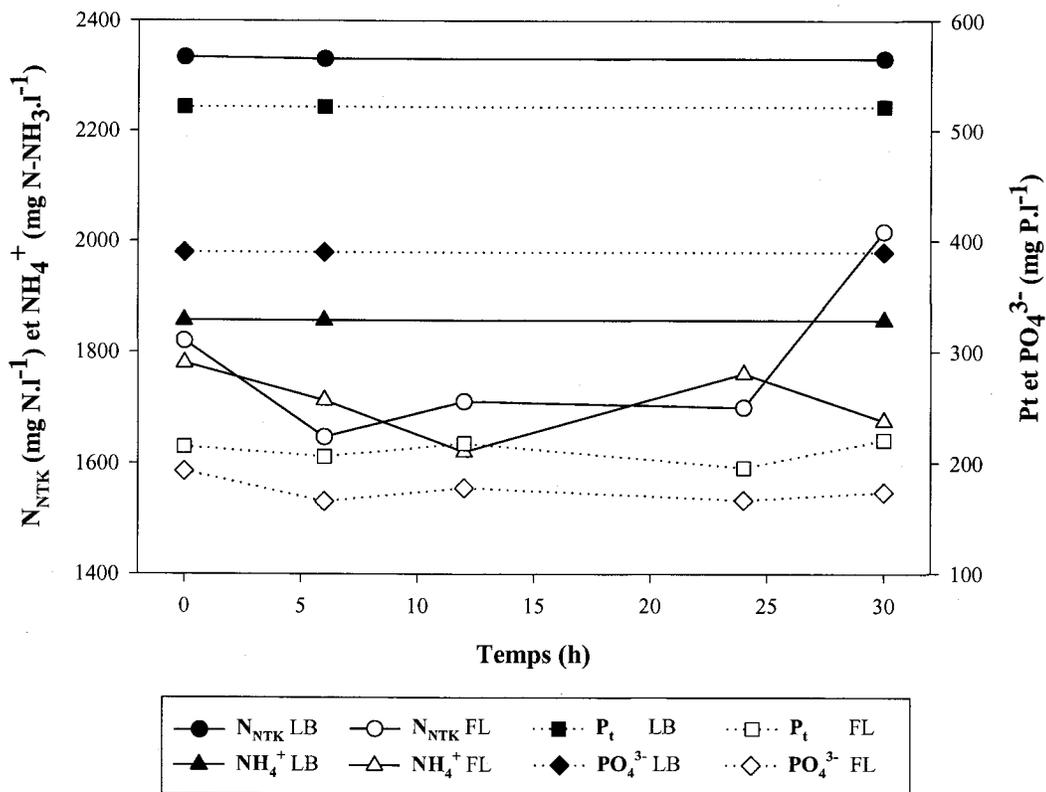


Figure 14 Variations des nutriments du LB et de la FL en fonction du temps pour l'essai LABCO01 ; lisier de maternité ; TRH = 4,6 h

À première vue, pour le lisier de maternité (LABCO01), il semble que les concentrations en solides, en DCO_t et en nutriments de la FL sont inférieures à celles du LB. (Voir les pourcentages d'enlèvements moyens présentés ultérieurement.)

Quant à la stabilité des concentrations de la FL dans le temps, il apparaît que les variations des ST, des MES, de la DCO_t, du P_t et du PO₄³⁻ sont faibles. Toutefois, l'étude des coefficients de variation sur ces paramètres montre que les variations des concentrations des ST et des MES semblent modérées et, valent respectivement 0,18 et 0,14 (annexe C, tableau 49). Noter que la légère hausse de la concentration en ST du LB semble se répercuter sur la concentration en ST de la FL.

Seules les concentrations en N_{NTK} et en NH_4^+ de la FL semblent subir certaines fluctuations bien que leur coefficient de variation respectif soit faible (0,08 pour N_{NTK} et 0,04 pour NH_4^+). Il s'agit probablement d'un effet d'échelle.

Une attention particulière doit être portée sur les concentrations en N_{NTK} et en NH_4^+ aux temps de 6 et 24 h. Il semble que les concentrations en NH_4^+ excèdent celles en N_{NTK} . La différence entre les concentrations égale environ 4 % tant à 6 h qu'à 24 h. Or, ces écarts peuvent être associés à l'échantillonnage et à la précision de l'appareil de mesure. Ils sont considérés comme étant à l'intérieur d'une marge d'erreur acceptable de 10 %.

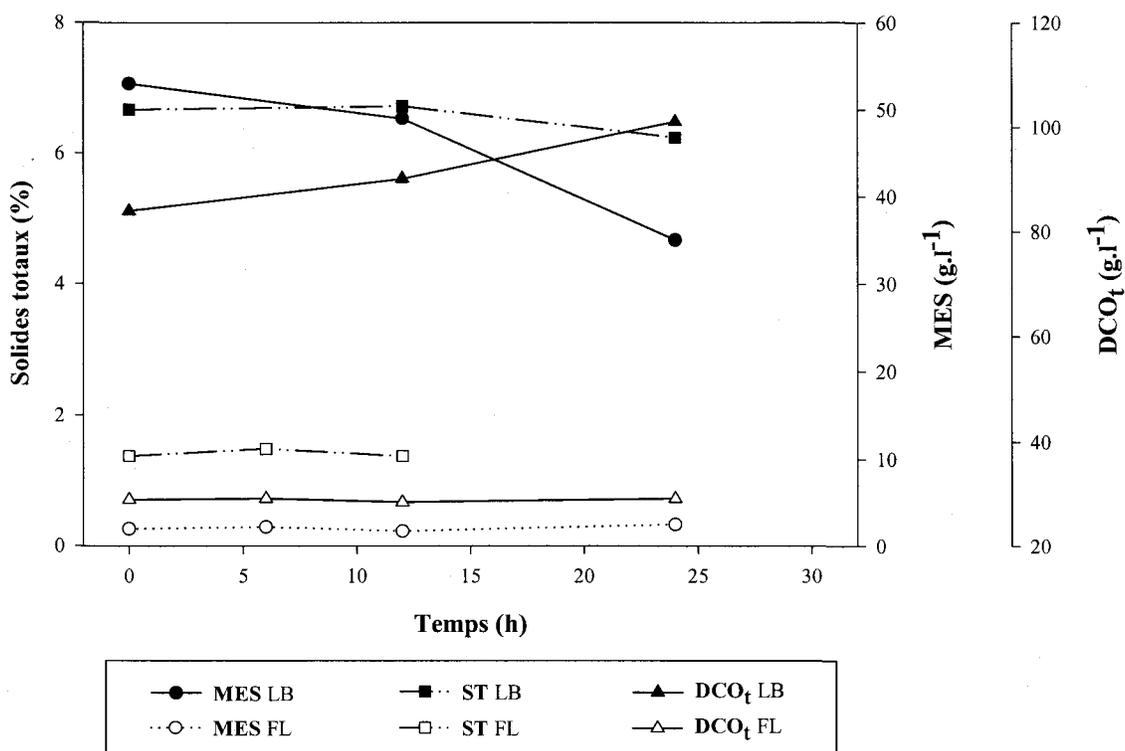


Figure 15 Variations des solides et de la DCO_t du LB et de la FL en fonction du temps pour l'essai LABCO03 ; lisier de pouponnière ; TRH = 6,4 h

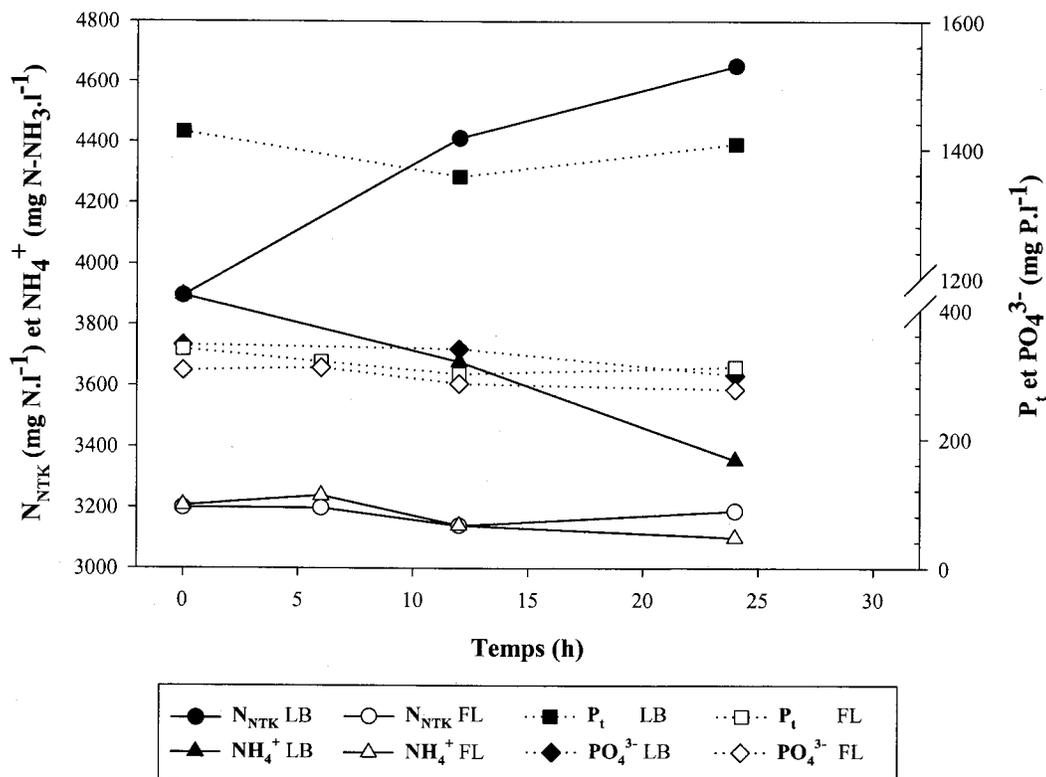


Figure 16 Variations des nutriments du LB et de la FL en fonction du temps pour l'essai LABCO03 ; lisier de pouponnière ; TRH = 6,4 h

Tout comme pour l'essai LABCO01, la diminution des concentrations des différents paramètres entre le LB et la FL est perceptible pour l'essai LABCO03. (Voir les pourcentages d'enlèvement moyens présentés ultérieurement.)

Les concentrations en solides, en DCO_t et en nutriments de la FL apparaissent relativement constantes pour toute la durée de l'essai, malgré des variations dans les concentrations du LB pour les paramètres suivants : ST, MES, DCO_t, N_{NTK} et NH_4^+ . Noter toutefois que tant pour le LB que pour la FL, les variations des MES dans le temps ressortent comme étant les plus importantes : 0,21 pour LB et 0,16 pour FL (annexe C, tableaux 48 et 49).

Enfin, certaines mesures de concentrations en N_{NTK} et en NH_4^+ de la FL apparaissent erronées aux temps de 0 et 6 h puisque les concentrations en NH_4^+ semblent dépasser les

concentrations en N_{NTK} . Encore une fois, des erreurs liées à l'échantillonnage et à la précision de l'appareil de mesure peuvent expliquer les différences entre ces concentrations qui sont inférieures à 2 % dans les deux cas. Ces écarts se retrouvent à l'intérieur de la marge d'erreur acceptable de 10 %.

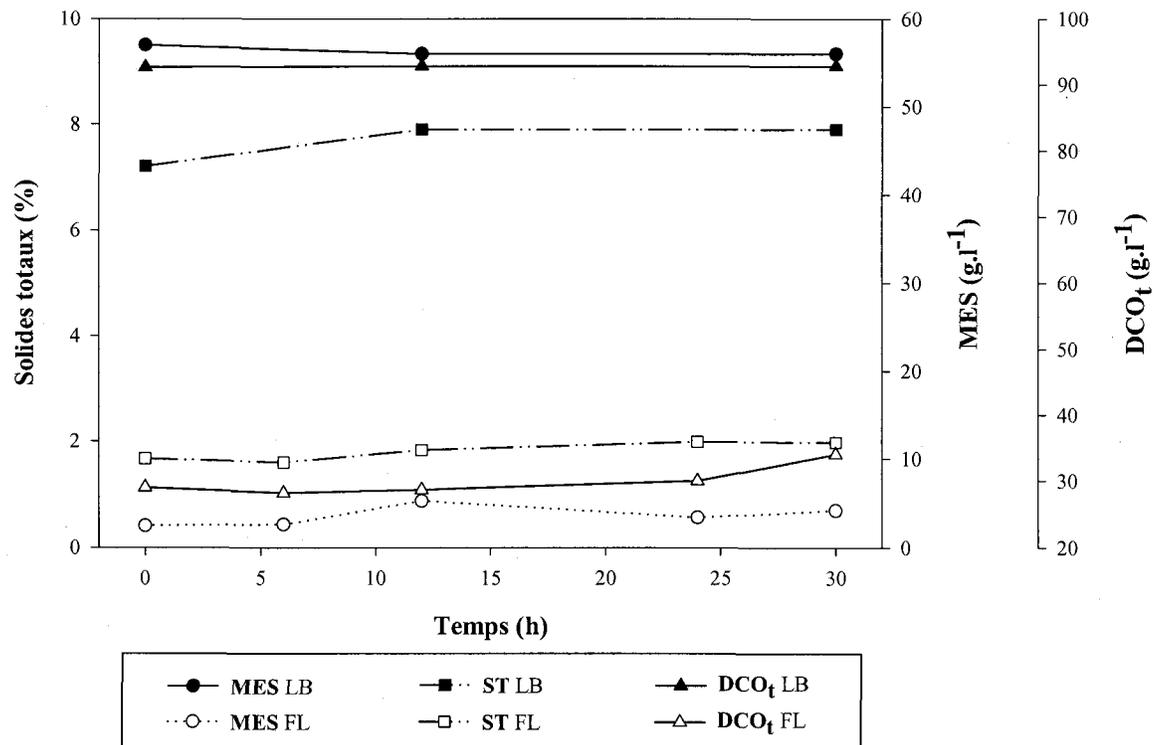


Figure 17 Variations des solides et de la DCO_t du LB et de la FL en fonction du temps pour l'essai LABCO05 ; lisier d'engraissement ; TRH = 6,4 h

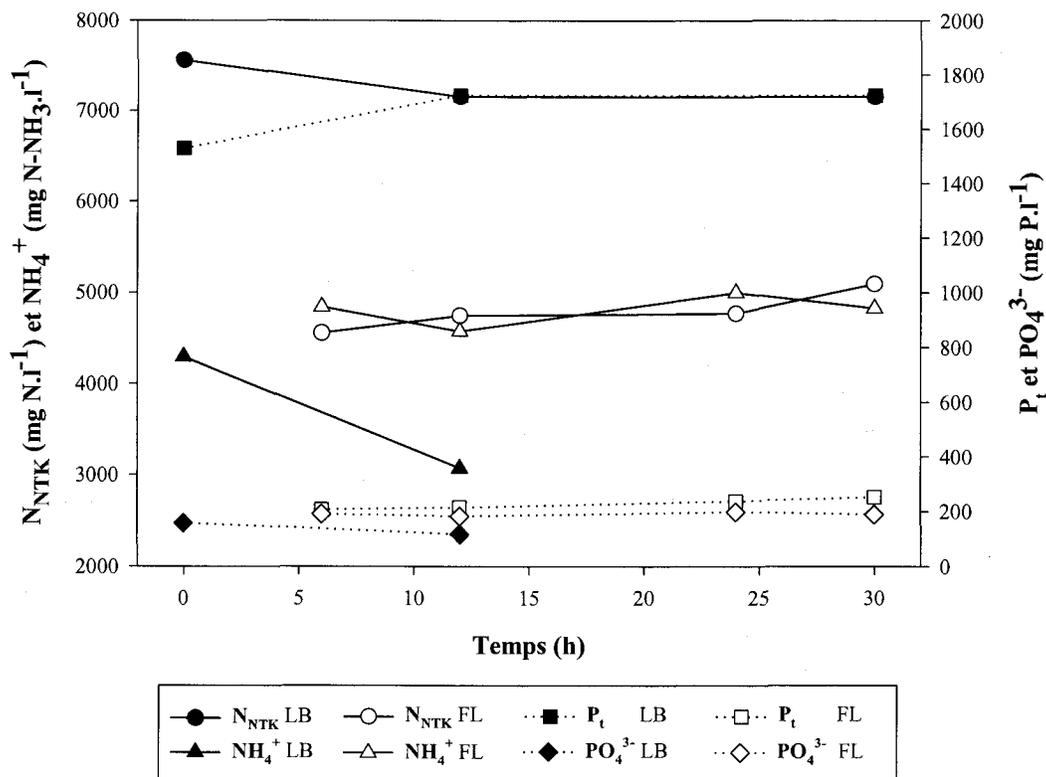


Figure 18 Variations des nutriments du LB et de la FL en fonction du temps pour l'essai LABCO05 ; lisier d'engraisement ; TRH = 6,4 h

Contrairement aux essais précédents, les concentrations en NH_4^+ et en PO_4^{3-} de la FL apparaissent supérieures à celles du LB d'où les pourcentages d'enlèvements négatifs présentés ultérieurement. Pour tous les autres paramètres, une diminution est observable entre les concentrations du LB et de la FL.

Quant à la stabilité des concentrations en fonction du temps de fonctionnement, elle semble bonne pour les concentrations en ST, en DCO_b , en N_{NTK} , en P_t , en NH_4^+ et en PO_4^{3-} . La variation dans le temps des concentrations de MES de la FL apparaît relativement élevée puisque le coefficient de variation égale 0,33 (annexe C, tableau 49).

Il importe de signaler certaines aberrations des concentrations de N_{NTK} et de NH_4^+ de la FL aux temps de 6 et 24 h. En fait, les concentrations de NH_4^+ apparaissent supérieures aux concentrations de N_{NTK} . Les différences entre les concentrations à 6 et 24 h sont respectivement de 6 et 5 % ce qui est en deçà de la marge d'erreur acceptable de 10 % liée à l'échantillonnage et à la précision de l'appareil.

Bref, la stabilité en mode de fonctionnement continu semble satisfaisante tant pour le lisier de maternité, que pour ceux de pouponnière et d'engraissement malgré les apparentes hausses en ions solubles (NH_4^+ et PO_4^{3-}) observées pour un seul essai avec le lisier d'engraissement. Autre fait à souligner : les concentrations en MES de la FL apparaissent les plus variables dans le temps.

Pour ce qui est des FS, les concentrations moyennes en ST, en N_{NTK} , en NH_4^+ , en P_t , en PO_4^{3-} et en CO ont des coefficients de variation maximaux égalant respectivement 25 %, 21 %, 20 %, 29 %, 36 % et 4 % (annexe C, tableau 50). Ainsi, les variations sur les concentrations des FS apparaissent relativement élevées, sauf pour les concentrations en CO.

3.2.2.3 Conclusion des essais en mode continu

En conclusion, les performances de séparation des lisiers de maternité, de pouponnière et d'engraissement en mode de fonctionnement continu semblent satisfaisantes puisque d'une part, les critères azote ammoniacal/phosphore total et de siccité sont respectés. D'autre part, les diverses concentrations des FL apparaissent relativement stables en fonction du temps de fonctionnement. Noter que les concentrations en MES tendent à démontrer une plus grande variabilité. Quant à la stabilité des concentrations des FS, elle semble faible compte tenu des coefficients de variation.

3.2.2.4 Comparaison entre les rendements de séparation en mode cuvée et en mode continu

La comparaison entre les rendements de séparation des deux modes de fonctionnement sera faite uniquement pour le lisier de maternité puisque aucun essai en mode cuvée a été réalisé

avec les lisiers de pouponnière et d'engraisement. Ainsi, la comparaison des rendements de séparation du lisier de maternité pour les modes de fonctionnement en cuvée et en continu montre dans un premier temps que le critère du ratio $N-NH_4^+/P_t$ est respecté dans les deux cas. Pour ce qui est du critère de siccité, il semble que la séparation en mode continu offre un rendement supérieur puisque ce critère est respecté pour ce mode de fonctionnement alors qu'il ne l'est pas pour le mode en cuvée.

En ce qui a trait aux pourcentages d'enlèvement maximaux des solides, des nutriments et de la DCO_t, ils sont comparables pour les deux modes de fonctionnement.

Ainsi, pour la séparation du lisier de maternité, il apparaît que le passage d'un mode de fonctionnement en cuvée vers un mode en continu est justifié, et même favorable en ce qui concerne le critère de siccité.

3.3 Essais de flottation à l'échelle pilote

Les essais de flottation à l'échelle du laboratoire étant concluants, il est dès lors envisageable de procéder à une première mise à l'échelle au niveau pilote. Noter que l'essai en mode continu PILCO01 a débuté avec un essai en mode cuvée (PILCU04) et, s'est terminé avec un essai en mode cuvée (PILCU02).

3.3.1 Observations visuelles de la séparation de phases par flottation biologique

Avant de procéder à l'analyse des essais de flottation en mode cuvée et en mode continu, il apparaît intéressant de décrire de façon générale le processus de séparation du lisier par flottation biologique. Pour ce faire, les observations visuelles réalisées au cours des essais de flottation à l'échelle pilote seront relatées.

Ainsi, les floccs nouvellement formés subissent une décantation initiale. Après un certain laps de temps, des bulles apparaissent dans la couche de floccs décantés. Ces bulles de diamètres variables sont captives de la couche de floccs et leur distribution apparaît aléatoire et non uniforme. Il semble qu'après la formation des bulles, des masses flocculées se détachent de la couche de floccs pour flotter jusqu'à la surface. Ce détachement

s'accompagne du dégagement de plusieurs bulles qui remontent rapidement vers la surface. Les dimensions des masses floculées sont très variables (quelques millimètres à plusieurs centimètres).

En somme, il apparaît possible de schématiser la dynamique de la séparation par flottation biologique en trois étapes principales : décantation initiale des solides, période de repos où il y a production de gaz dans la couche de solides décantés et flottation massives des solides.

3.3.2 Essais en mode cuvée

Les essais en mode cuvée ont permis la séparation des lisiers de maternité (PILCU01) et d'engraissement (PILCU02 à PILCU05) en des fractions liquides (FL) et solides (FS). Les concentrations en solides, en DCO_t et en nutriments des lisiers bruts (LB) utilisés au cours de ces essais ainsi que les coefficients de variation qui leur sont associés sont présentés dans des tableaux à l'annexe D (tableaux 51 et 54).

Noter que, contrairement aux coefficients de variation des essais de flottation à l'échelle du laboratoire, les coefficients de variation calculés pour les essais de flottation à l'échelle pilote permettront de juger de la représentativité (prélèvement, conservation et analyse) des échantillons prélevés en triplicata pour chaque paramètre à mesurer.

Dans un premier temps, il est possible de s'attarder aux résultats obtenus pour les FL. Les détails des concentrations en solides, en DCO_t et en nutriments des FL de même que leur coefficient de variation se retrouvent à l'annexe D (tableaux 52 et 55). Les pourcentages d'enlèvement moyens pour ces paramètres et les valeurs du ratio $N-NH_4^+/P_t$ sont exposés dans le tableau ci-après. Prendre note que les chiffres entre parenthèses représentent les valeurs du ratio $N-NH_4^+/P_t$ pour les LB.

Tableau 30 Caractéristiques des fractions liquides (FL) générées lors des essais de flottation en mode cuvée à l'échelle pilote

Lisier	Maternité	Engraissement			
		LPM 9511	Zetag 7654	LPM 9511	LPM 9511
Polymère	Zetag 7557	LPM 9511	Zetag 7654	LPM 9511	LPM 9511
TRH (h)	14	11	18	22	24
Paramètres	PILCU01	PILCU02	PILCU03	PILCU04	PILCU05
N-NH ₄ ⁺ /P _t	9 (1)	15 (2)	3 (1)	9 (2)	7 (4)
ST (% Enl.)	82	60	45	57	38
MES (% Enl.)	90	90	12	77	84
N _{NTK} (% Enl.)	59	36	34	18	25
P _t (% Enl.)	89	78	53	69	26
NH ₄ ⁺ (% Enl.)	17	-73	-92	-49	-22
PO ₄ ³⁻ (% Enl.)	0	-87	-148	-47	-38
DCO _t (% Enl.)	79	51	34	33	40

Avant toute chose, une attention particulière sera portée à l'essai PILCU03. Les performances de l'essai PILCU03 au niveau du critère azote ammoniacal/phosphore total et des pourcentages d'enlèvement des ST, des MES, de NH₄⁺ et de PO₄³⁻ semblent détonner par rapport à celles des autres essais. Les pourcentages d'enlèvement moyens des ST (45 %), et surtout des MES (12 %), apparaissent faibles. Ces pourcentages d'enlèvement tendent à corroborer les observations réalisées lors de l'essai qui faisaient mention d'une séparation par flottation médiocre. De ce fait, l'essai PILCU03 est considéré comme un essai manqué et ses résultats ne seront pas utilisés pour le présent travail de recherche.

Il est maintenant possible de s'attarder au critère du ratio azote ammoniacal/phosphore total. La séparation en mode cuvée à l'échelle pilote tend à accroître le ratio N-NH₄⁺/P_t des LB puisque les ratios N-NH₄⁺/P_t des FL égalent ou excèdent 7 (critère fixé).

Ensuite, l'étude des performances d'enlèvement en solides, en nutriments et en DCO_t montre que les rendements semblent supérieurs pour l'essai PILCU01 réalisé avec des lisiers de maternité. Les pourcentages d'enlèvement maximaux sont : ST, 82 % ; MES, 90 % ; N_{NTK}, 59 % ; P_t, 89 % ; NH₄⁺, 17 % ; PO₄³⁻, 0 % ; DCO_t, 79 %. Pour ce qui est des

rendements des essais complétés avec les lisiers d'engraisement, les pourcentages d'enlèvement maximaux sont : ST, 60 % ; MES, 90 % ; N_{NTK} , 36 % ; P_t , 78 % et DCO_t , 51 %. Noter qu'il semble y avoir un accroissement des concentrations en ions solubles (NH_4^+ et PO_4^{3-}) pour ces essais. Les pourcentages d'augmentation maximaux en NH_4^+ et en PO_4^{3-} s'élèvent respectivement à 73 et 87 % (essai PILCU02).

Il importe de s'attarder aux hausses des concentrations de NH_4^+ et de PO_4^{3-} qui ont aussi été observées lors d'un essai en mode continu à l'échelle du laboratoire avec du lisier d'engraisement (LABCO05). Deux hypothèses avaient alors été posées pour tenter d'expliquer ces augmentations en ions solubles : la représentativité des échantillons et les phénomènes de transformations associés au LB et au processus de séparation par flottation biologique. Les coefficients de variation calculés pour les présents essais tendent à démontrer que la représentativité des échantillons des LB est plutôt modérée pour les paramètres du NH_4^+ et du PO_4^{3-} : coefficients de variation de 0,15 à 0,28 pour le NH_4^+ et de 0,14 à 0,30 pour le PO_4^{3-} (annexe D, tableau 54). Seul le LB de l'essai PILCU05 présente une bonne représentativité des échantillons pour ces paramètres. Quant à la représentativité des échantillons des FL pour ces paramètres, elles semblent bonnes dans tous les cas, sauf pour le paramètre du NH_4^+ de l'essai PILCU01 : coefficient de variation de 0,12 (annexe D, tableau 55). Ainsi, des réserves relatives aux valeurs des pourcentages d'enlèvement négatifs pour ces paramètres peuvent être émises en raison de la représentativité discutable des échantillons de NH_4^+ et de PO_4^{3-} du LB. Néanmoins, l'hypothèse des phénomènes de transformations ne semble pas totalement révoquée puisque des pourcentages d'enlèvement négatifs sont calculés pour l'essai PILCU05 alors que la représentativité des échantillons de NH_4^+ et de PO_4^{3-} du LB et de la FL tend à être bonne (coefficients de variation égaux ou inférieurs à 0,04).

Pour ce qui est des FS recueillies au cours de ces essais, elles possèdent les caractéristiques exposées au tableau suivant. Les concentrations en nutriments et en carbone des FS sont présentées à l'annexe D (tableau 53).

Tableau 31 Caractéristiques des fractions solides (FS) générées lors des essais de flottation en mode cuvée à l'échelle pilote

Lisier	Maternité	Engraissement			
		LPM 9511	Zetag 7654	LPM 9511	LPM 9511
Polymère	Zetag 7557	LPM 9511	Zetag 7654	LPM 9511	LPM 9511
TRH (h)	14	11	18	22	24
Paramètres	PILCU01	PILCU02	PILCU03	PILCU04	PILCU05
ST (%)	13,9 ± 0,4	9,8 ± 0,3	11,1 ± 0,3 ^a	5,1 ± 0,1	8,8 ± 0,3
C/N	9	5	5	-	-

^a Les valeurs raturées ne sont pas valables puisque l'essai PILCU03 est considéré comme manqué.

Il importe d'abord de vérifier si les FS générées respectent le critère de siccité fixé à 10 % ST. Le critère de siccité semble respecté pour les essais avec le lisier de maternité (PILCU01) et pour un essai avec le lisier d'engraissement (PILCU02). Le ratio C/N équivaut à 9 pour la FS issue de l'essai PILCU01 et à 5 pour les FS de l'essai PILCU02. Les ratios C/N s'avèrent inférieurs aux ratios suggérés pour le compostage (C/N compris entre 30 et 35).

Dans l'ensemble, il apparaît que la flottation des lisiers de maternité et d'engraissement en mode cuvée est, non seulement possible, mais également reproductible et ce, pour des conditions variables. La FL obtenue répond au critère $N-NH_4^+/P_t$ dans 4 cas sur 4 (excluant l'essai PILCU03) alors que la FS générée respecte le critère de siccité dans 2 cas sur 4. Il apparaît donc justifier de vérifier la possibilité d'opérer en mode de fonctionnement continu.

3.3.3 Essais en mode continu

Le passage d'un mode de fonctionnement en cuvée vers un mode de fonctionnement en continu s'est avéré réalisable puisqu'il a été possible de séparer du lisier brut (LB) d'engraissement (PILCO01) en des fractions liquides (FL) et des fractions solides (FS). Les concentrations moyennes en solides, en DCO_t et en nutriments des LB ainsi que leur coefficient de variation sont présentés dans des tableaux à l'annexe D (tableaux 57 et 58).

3.3.3.1 Performances de la séparation du lisier d'engraissement

En premier lieu, il est possible d'analyser les résultats obtenus pour les FL générées. À cet effet, le tableau qui suit présente les concentrations moyennes en solides, en DCO_t et en nutriments accompagnées de leur pourcentage d'enlèvement respectif (chiffres entre parenthèses sous-jacents aux concentrations). De surcroît, les valeurs du ratio $\text{N-NH}_4^+/\text{P}_t$ des FL sont montrées ainsi que celles pour les LB (chiffres entre parenthèses adjacents aux ratios). Prendre note que les concentrations au temps de 0 h correspondent à celles de la FL à la fin de l'essai en mode cuvée PILCU04. Quant aux pourcentages d'enlèvement des FL aux temps de 24 et 36 h, ils sont calculés à partir des concentrations moyennes du LB du temps précédent. Par exemple, les pourcentages d'enlèvement de la FL au temps de 24 h sont calculés par rapport aux concentrations moyennes du LB au temps de 0 h.

Tableau 32 Caractéristiques des fractions liquides (FL) générées lors de l'essai de flottation en mode continu à l'échelle pilote ; lisier d'engrais ; TRH = 22 h ; polymère LPM 9511

Paramètres	Temps (h)		
	0	24	36
ST	1,7 ± 0,0	1,3 ± 0,0	1,3 ± 0,0
(%)		(63)	(60)
MES	3 360 ± 243	2 040 ± 355	2 010 ± 47
(mg·l ⁻¹)		(87)	(84)
N _{NTK}	4 950 ± 125	3 920 ± 138	3 920 ± 98
(mg N·l ⁻¹)		(36)	(38)
NH ₄ ⁺	3 170 ± 78	3 540 ± 202	3 670 ± 103
(mg N-NH ₃ ·l ⁻¹)		(-26)	(-71)
P _t	341 ± 12	258 ± 11	250 ± 9
(mg P·l ⁻¹)		(77)	(78)
PO ₄ ³⁻	149 ± 6	163 ± 5	179 ± 3
(mg P·l ⁻¹)		(-15)	(-63)
DCO _t	30 000 ± 2 010	18 600 ± 1 400	21 700 ± 867
(mg·l ⁻¹)		(59)	(51)
N-NH ₄ ⁺ /P _t	9(2)	14(2)	15(2)

Première chose à vérifier : le respect du critère azote ammoniacal/phosphore total des FL. Les valeurs des ratios N-NH₄⁺/P_t sont au-delà de la valeur prescrite, soit N-NH₄⁺/P_t égal ou supérieur à 7. Il semblerait même que les performances s'accroissent dans le temps pour atteindre un certain plateau. Il serait maintenant intéressant de se pencher sur les performances d'enlèvement en solides, en nutriments et en DCO_t des FL. Les pourcentages d'enlèvement maximaux sont : ST, 63 % ; MES, 87 % ; N_{NTK}, 38 % ; P_t, 78 % et DCO_t, 59 %. Remarquer qu'une fois encore les concentrations en ions solubles (NH₄⁺ et PO₄³⁻) semblent s'accroître. Les pourcentages d'augmentation maximaux sont : NH₄⁺, 71 % et PO₄³⁻, 63 % et ce, au bout de 36 h de fonctionnement. Tout comme pour les essais de flottation en mode cuvée à l'échelle pilote, la représentativité des échantillons de NH₄⁺ et de PO₄³⁻ est évaluée à partir des coefficients de variation (annexe D, tableaux 58 et 59). Or, il

ressort que la représentativité des échantillons de NH_4^+ et de PO_4^{3-} du LB semble bonne au temps de 0 h, alors qu'elle apparaît modérée au temps de 24 h (coefficients de variation de 0,15 pour le NH_4^+ et de 0,14 pour le PO_4^{3-}). Pour ce qui est de la représentativité des échantillons des FL au temps de 24 et 36 h, elle semble bonne pour les deux paramètres (coefficients de variation égaux ou inférieurs à 0,06). Ainsi, la représentativité modérée des échantillons du LB au temps de 24 h pourrait être expliquée les pourcentages d'enlèvement négatifs pour le NH_4^+ et le PO_4^{3-} perceptibles au temps de 36 h. Toutefois, des augmentations en NH_4^+ et en PO_4^{3-} semblent également observables au temps de 24 h malgré la bonne représentativité des échantillons pour le LB et la FL d'où l'impossibilité de réfuter l'hypothèse des phénomènes de transformations inhérents au LB ou au processus de séparation par flottation biologique.

En second lieu, il importe d'étudier les FS générées au cours de cet essai. Les concentrations en solides, en nutriments et en carbone des FS sont détaillées au tableau qui suit.

Tableau 33 Caractéristiques des fractions solides (FS) générées lors de l'essai de flottation en mode continu à l'échelle pilote ; lisier d'engrais ; TRH = 22 h ; polymère LPM 9511

Paramètres	Temps (h)		
	0	24	36
ST (%)	5,1 ± 0,1	6,3 ± 0,2	7,3 ± 0,2
N _{NTK} (% B.S.)	-	-	-
NH ₄ ⁺ (% B.S.)	13,0 ± 0,5	12,1 ± 0,2	12,0 ± 0,1
P _t (% B.S.)	3,1 ± 0,5	3,1 ± 0,0	3,2 ± 0,1
PO ₄ ³⁻ (% B.S.)	1,7 ± 0,0	1,4 ± 0,0	1,4 ± 0,1
CO (% B.S.)	-	49	49 ± 0
C/N	-	-	-

L'analyse des concentrations en ST fait ressortir que les FS ne semblent pas respecter le critère de siccité de 10 % ST.

En somme, les performances de la séparation en mode continu à l'échelle pilote semblent satisfaisantes en ce qui a trait au respect du critère azote ammoniacal/phosphore total de la FL. Par contre, au niveau de la FS, des lacunes apparaissent concernant le respect du critère de siccité.

3.3.3.2 Stabilité des performances de séparation dans le temps

Tout comme pour les essais de flottation à l'échelle du laboratoire, il est primordial de vérifier que les concentrations en solides, en DCO_t et en nutriments sont constantes dans le temps lorsque le mode de fonctionnement est en continu. Étant donné le nombre restreint

d'échantillonnage²⁰ des FL et des FS, aucune courbe ne sera tracée. Par contre, la comparaison des concentrations des FL et des FS (tableaux 32 et 33) permettra de vérifier la stabilité de fonctionnement du flottateur. Noter que le nombre de cycles complétés lors de cet essai en continu égale 1,6²¹. Il importe de signifier que la représentativité des concentrations semble généralement bonne à l'exception de celle des concentrations des MES du LB qui apparaît modérée (coefficients de variation de 0,14 et 0,22) (annexe D, tableau 58).

Pour les FL, les concentrations en ST, en MES, en N_{NTK} et en P_t tendent à diminuer entre 0 et 24 h. Par contre, elles semblent relativement constantes entre 24 et 36 h et ce, malgré le fait que les concentrations en MES et en N_{NTK} du LB présentent certaines variations (légère diminution des MES et légère hausse du N_{NTK}). Pour ce qui est des concentrations en DCO_t , elles tendent à diminuer entre 0 et 24 h alors qu'elles semblent s'accroître entre 24 et 36 h. Pourtant, les concentrations en DCO_t du LB présentent une légère baisse. Enfin, les concentrations en NH_4^+ et en PO_4^{3-} tendent à hausser entre 0 et 24 h. Ces augmentations semblent se maintenir entre 24 et 36 h bien que les concentrations en NH_4^+ et en PO_4^{3-} du LB tendent à diminuer. Prendre note que les hausses des concentrations en NH_4^+ et en PO_4^{3-} semblent être indépendantes des concentrations en N_{NTK} et en P_t qui tendent à demeurer constantes.

Quant aux FS, les concentrations en P_t et en CO tendent à demeurer constantes. Les concentrations en ST semblent s'accroître en fonction du temps. Enfin, une baisse des concentrations en PO_4^{3-} semble apparente entre 0 et 24 h et elle tend à s'atténuer entre 24 et 36 h.

Dans son ensemble, le fonctionnement du flottateur à l'échelle pilote apparaît relativement stable. Toutefois, les concentrations en NH_4^+ , en PO_4^{3-} et en DCO_t tendent à augmenter

²⁰ L'échantillonnage a été planifié à intervalles réguliers de 24 h puisque le temps de rétention hydraulique était de 22 h. En conséquence, il n'y a que trois mesures dans le temps puisque l'essai a duré 36 h.

²¹ Nombre de cycles complétés = durée de l'essai / TRH = 36 h / 22 h = 1,6.

pour les FL alors que pour les FS, les concentrations en ST tendent à s'accroître, contrairement à celles en PO_4^{3-} qui montrent une légère baisse.

3.3.3.3 Conclusion des essais en mode continu

En somme, les performances de séparation du lisier d'engraisement à l'échelle pilote pour un fonctionnement continu apparaissent satisfaisantes pour le respect du critère azote ammoniacal/phosphore total de la FL, mais pas pour le respect du critère de siccité de la FS. Quant à la stabilité du système, elle semble correcte pour la majorité des concentrations des FL et des FS, sauf pour les paramètres NH_4^+ et PO_4^{3-} des FL où des hausses de concentrations tendent à se faire sentir. Ces augmentations en NH_4^+ et en PO_4^{3-} pourraient être d'origines biologiques. Enfin, les réserves apportées au niveau de la représentativité des concentrations de MES peuvent se justifier par le fait que les matières flottantes et colloïdales du lisier rendent la mesure des MES difficile à réaliser avec une bonne reproductibilité (Theobald, 1992).

3.3.3.4 Comparaison entre les rendements de séparation en mode cuvée et en mode continu pour le lisier d'engraisement

La comparaison entre les rendements de séparation des essais en mode cuvée (PILCU02 et PILCU04) avec ceux de l'essai en mode continu (essai PILCO01) fait d'abord ressortir que le critère du ratio $\text{N-NH}_4^+/\text{P}_t$ de la FL semble respecté pour les deux modes de fonctionnement. Par contre, le respect du critère de siccité de la FS tend à être problématique puisqu'il n'est atteint en aucun cas. Noter que la concentration en ST de la FS issue de l'essai en mode cuvée PILCU02 tend à être supérieure à celles de l'essai en mode cuvée PILCU04 et en mode continu PILCO01.

Au niveau des performances d'enlèvement, l'essai en mode cuvée PILCU02 semblent se démarquer de l'essai PILCU04 puisque ses pourcentages d'enlèvement moyens apparaissent supérieurs (ST, 60 % ; MES, 90 % ; N_{NTK} , 36 % ; P_t , 78 % ; DCO_t , 51 % ; NH_4^+ , -73 % et PO_4^{3-} , -87 %). Ces derniers seront retenus pour les fins de la comparaison avec l'essai en mode continu PILCO01. Il apparaît donc que les performances d'enlèvement

sont comparables pour les ST, les MES, le N_{NTK} , le P_t et la DCO_t . De surcroît, des accroissements en NH_4^+ et en PO_4^{3-} sont dénotés pour les deux modes de fonctionnement.

Bref, les différences, en terme de séparation du lisier d'engraissement, semblent minimales entre un fonctionnement en mode cuvée et un fonctionnement en mode continu. Toutefois, le fait que la siccité de la FS ait été supérieure en mode cuvée suggère qu'il soit favorable d'améliorer le mode de récolte des FS en mode continu. À cet effet, Mels *et al.* (2001) rapportent qu'un raclage intermittent aide à accroître la siccité de la FS recueillie. Or, lors de l'essai PILCO01, le raclage était réalisé en continu. Ainsi, des changements au niveau du raclage devront être apportés ultérieurement.

3.3.3.5 Étude des paramètres de conception et d'opération utilisés pour la séparation du lisier par flottation biologique en mode continu

Il apparaît intéressant de comparer les paramètres de conception et d'opération des systèmes de séparation du lisier par flottation provoquée biologiquement à celui des systèmes de séparation de boues d'épuration²² par flottation provoquée à air dissous (section 1.7.1.4). Le but de cette comparaison est uniquement d'entrevoir quelques particularités sur la flottation biologique du lisier de porc qui demanderont à être vérifiées ultérieurement. Prendre note que le ratio air/solide n'a pas pu être calculé pour les systèmes de séparation par flottation provoquée biologiquement. La synthèse des paramètres de conception et d'opération utilisés aux cours des essais à l'échelle du laboratoire (LABCO) et à l'échelle pilote (PILCO) est présentée dans le tableau qui suit. Noter qu'un tableau plus détaillé se trouve à l'annexe D (tableau 62).

²² La comparaison est limitée par le fait que des données sur la flottation à air dissous du lisier de porc ne soient pas disponibles. C'est pourquoi les données pour les boues de station d'épuration sont utilisées.

Tableau 34 Synthèse des paramètres de conception et d'opération des essais en mode de fonctionnement continu

Lisier	Maternité		Pouponnière		Engraissement		
Polymère	Zetag 7557		Zetag 7557		LPM 9511		
Paramètres	LABCO01	LABCO02	LABCO03	LABCO04	LABCO05	LABCO06	PILCO01
ST (%)	1,8	4,4	6,5	4,8	7,6	5,7	3,4
TRH (h)	4,6	4,6	6,4	6,4	6,4	6,4	21
Charge hydraulique ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{j}^{-1}$)	2,6	2,6	1,9	1,9	1,9	1,9	1,2
Charge de solides ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{j}^{-1}$)	26,4	113	86,4	60,0	108	69,6	16,8
Ajout de polymère ($\times 10^3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	19,8	4,74	4,39	6,32	3,54	5,49	14,9

Il est d'abord possible de remarquer que les charges hydrauliques pour la flottation biologique (entre 1,2 et 2,6 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{j}^{-1}$) apparaissent nettement inférieures à celles pour la flottation à air dissous (entre 90 et 250 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{j}^{-1}$). Cet écart peut s'expliquer par la différence des débits injectés qui dépendent du temps de rétention hydraulique fixé. En fait, les systèmes de flottation à air dissous demandent un temps de rétention hydraulique moindres (0,05 à 1 h) (Blais et Tyagi, 2000) d'où les forts débits d'entrée et par conséquent, les fortes charges hydrauliques.

Ensuite, les charges de solides pour la flottation biologique semblent incluses dans l'intervalle de valeurs typiques pour la flottation à air dissous (entre 90 et 200 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{j}^{-1}$) dans 2 cas sur 7, soit pour les essais LABCO02 et LABCO05.

Enfin, les ajouts de polymère (5 cas sur 7) tendent à être comparables ou légèrement plus importants pour la flottation biologique du lisier de porc que pour la flottation à air dissous des boues de stations d'épuration ayant une concentration en solides totaux similaire à celle

du lisier. À cet effet, il est reconnu que la séparation du lisier de porc exige des dosages importants de polymère (Aquatech Société de gestion de l'eau, 1984).

En gardant à l'esprit les limites de la présente comparaison, il est possible de poser les hypothèses suivantes pour la flottation biologique du lisier de porc par rapport à la flottation à air dissous de boues d'épuration :

- Les charges hydrauliques sont faibles ;
- Les charges en solides sont relativement comparables ;
- Les ajouts de polymères sont plus élevés.

De plus, les informations fournies par les charges hydrauliques et les charges en solides ouvrent la voie à l'optimisation de la conception du flottateur puisque la variable de la surface du flottateur est introduite. Enfin, la connaissance des valeurs typiques de ces charges pour une flottation optimisée pourrait faciliter le contrôle de la séparation par flottation biologique lors de l'opération du flottateur.

3.3.4 Suivi des performances d'un filtre à base de tourbe

Le suivi des performances d'un filtre à base de tourbe a été réalisé en concomitance avec les essais de flottation à l'échelle pilote en mode cuvée et en mode continu. Les performances d'épuration du filtre par rapport aux critères d'azote ammoniacal/phosphore total et de siccité de même qu'aux pourcentages d'enlèvement seront exposées dans un premier temps.

Ensuite, la stabilité des performances épuratoires et hydrauliques sera analysée. Enfin, les principales conclusions quant à l'utilisation d'un filtre de tourbe seront énoncées.

Dans un premier temps, les performances du filtre sont présentées au tableau suivant qui détaille les valeurs des ratios $N-NH_4^+/P_t$ ainsi que les pourcentages d'enlèvement moyens en solides, en nutriments, en DCO_t et en coliformes fécaux (CF) pour les fractions liquides filtrées (FLF) obtenues au cours des essais. Ces pourcentages sont calculés par rapport aux concentrations des fractions liquides (FL) soutirées du flottateur. Les chiffres entre parenthèses correspondent aux valeurs du ratio $N-NH_4^+/P_t$ des FL. Noter que les tableaux des concentrations moyennes des FL et des FLF sont montrés à l'annexe D (tableaux 63 et

64). De plus, des coefficients de variation associés aux concentrations des FL et des FLF ont été calculés et ils sont synthétisés dans des tableaux à l'annexe D (tableaux 65 et 66).

Tableau 35 Caractéristiques des fractions liquides filtrées (FLF) générées lors des essais de flottation en mode cuvée et en mode continu à l'échelle pilote

Temps de fonctionnement	4,8 j	37,5 j	44,5 j	45,4 j	91,1 j	91,4 j	92,2 j	92,4 j
TRH	0,35 j	0,40 j	2,1 j	2,1 j	0,71 j	0,71 j	5,9 j	5,9 j
Paramètres	FIL01	FIL02	FIL03		FIL04			
N-NH ₄ ⁺ /P _t	12 (9)	9 (7)	16 (8)	16 (7)	16 (14)	-	19 (15)	21 (15)
ST (% Enl.)	9	53	-30	-97	39	-	30	32
MES (% Enl.)	69	90	50	0	89	-	83	90
N _{NTK} (% Enl.)	0	57	-17	-44	39	-	36	37
NH ₄ ⁺ (% Enl.)	-10	18	-29	-46	41	-	31	25
P _t (% Enl.)	16	37	36	34	48	-	47	47
PO ₄ ³⁻ (% Enl.)	-12	-75	33	45	21	-	33	43
DCO _t (% Enl.)	4	79	-29	-14	62	-	60	52
CF (% Enl.)	-	-	-	-	-	84	85	79

Avant toute chose, il faut souligner que la filtration tend à accroître les valeurs du ratio N-NH₄⁺/P_t des FL qui, faut-il le mentionner, respectent déjà le critère N-NH₄⁺/P_t (égal ou supérieur à 7). Ainsi, les FLF font plus que répondre au critère N-NH₄⁺/P_t.

Quant aux pourcentages d'enlèvement maximaux, ils correspondent pour chaque paramètre à : ST, 53 % ; MES, 90 % ; N_{NTK}, 57 % ; NH₄⁺, 41 % ; P_t, 48 % ; PO₄³⁻, 45 % ; DCO_t, 79 % et CF, 85 %. Toutefois, certains paramètres semblent présenter des augmentations de concentrations. Les pourcentages maximaux d'augmentation sont : ST, 97 % ; N_{NTK}, 44 % ; NH₄⁺, 46 % ; PO₄³⁻, 75 % et DCO_t, 29 %. La plupart des augmentations se sont produites après 44,5 et 45,4 jours de fonctionnement, sauf pour les concentrations en NH₄⁺ et en PO₄³⁻ où les hausses semblent observables dès les premières journées de fonctionnement.

Après avoir étudié les performances épuratoires du filtre, il est nécessaire de s'attarder à ces performances hydrauliques et à la stabilité du système. Les figures suivantes présentent les

performances du filtre de tourbe et les charges hydrauliques appliquées en fonction du temps de fonctionnement²³ du filtre. Noter que les remaniements du médium filtrant sont marqués par la lettre **B** au-dessus de la bordure supérieure des graphiques.

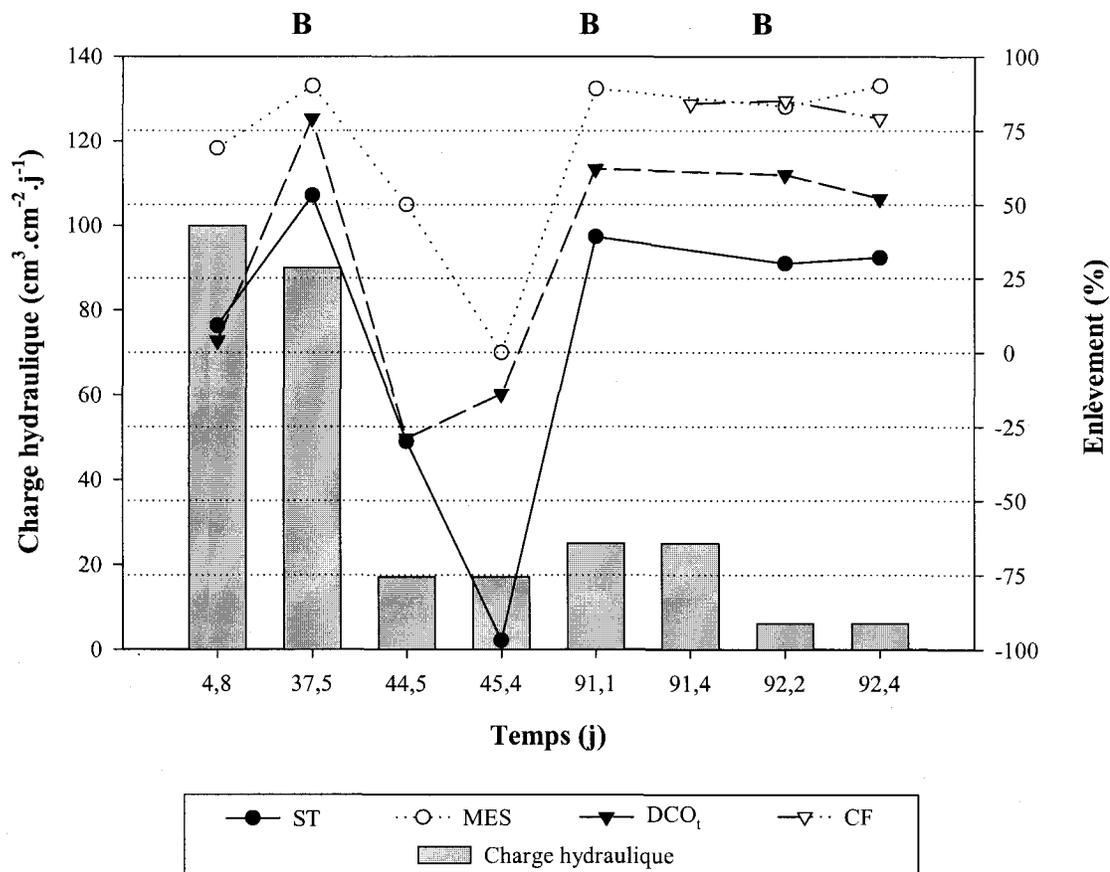


Figure 19 Performances du filtre de tourbe pour les ST, les MES, la DCO_t et les CF en fonction du temps de fonctionnement

²³ Prendre note que le fonctionnement du filtre est discontinu (section 2.2.3.4). La filtration a été interrompue à 4,8, 37,5, 45,4 et 92,5 j.

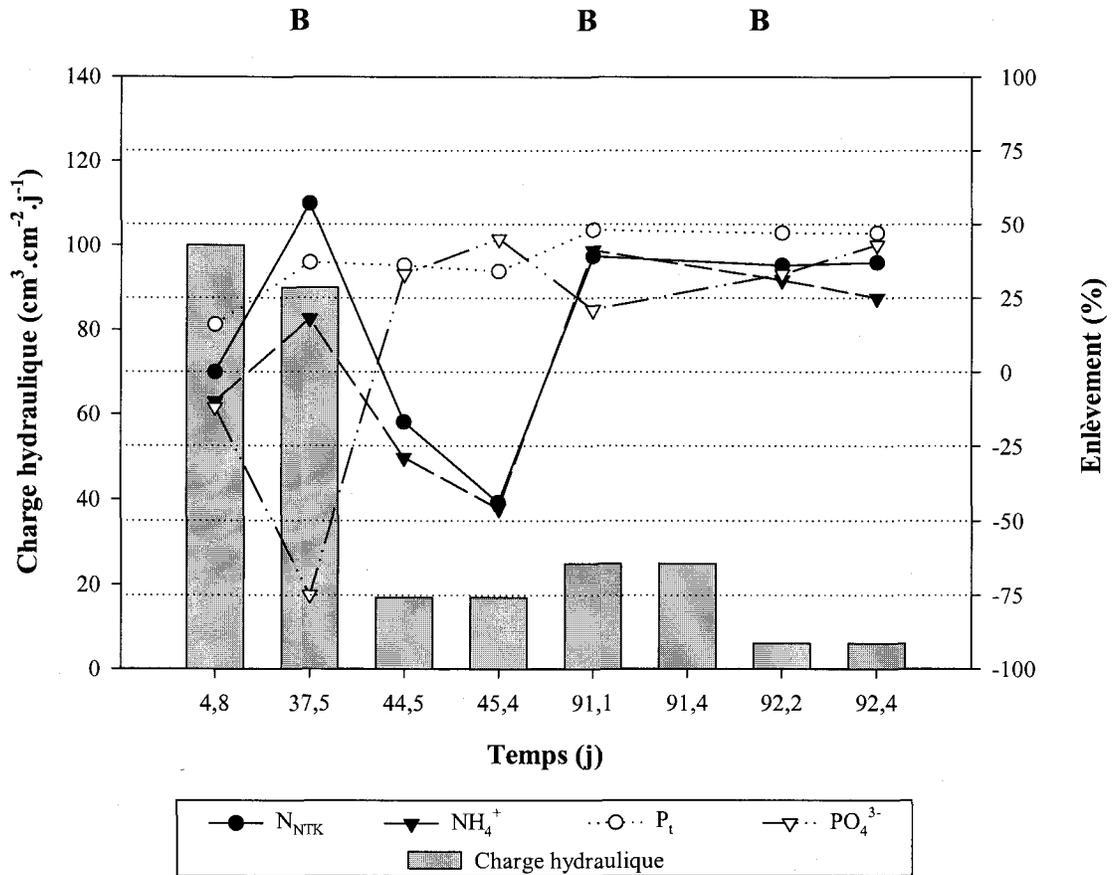


Figure 20 Performances du filtre de tourbe pour les nutriments en fonction du temps de fonctionnement

De prime abord, la charge hydraulique appliquée sur le filtre tend à décroître en fonction du temps de fonctionnement du filtre. D'ailleurs, les remaniements du médium filtrant (B) apparaissent plus fréquents vers la fin du suivi. Noter qu'après le dernier remaniement, l'amélioration de la charge hydraulique ne semble pas perceptible. Le premier colmatage semble survenir autour du 37^{ième} jour de fonctionnement, soit après une période d'arrêt d'environ 32 jours.

Ensuite, la vérification de la stabilité du système s'impose. Les performances épuratoires du filtre pour les solides, les nutriments et la DCO_t, représentées par les courbes, semblent instables pour les 45 premiers jours de fonctionnement. À l'inverse, le filtre tend à gagner en stabilité après 91 journées de fonctionnement. Toutefois, les charges appliquées à ce moment apparaissent nettement inférieures à celles appliquées en début de suivi.

En conclusion, le filtre de tourbe tend à accroître le ratio $N-NH_4^+/P_t$ des FL. Les performances épuratoires, quoique intéressantes, semblent très variables et instables. Enfin, les charges hydrauliques appliquées sur le filtre tendent à décroître avec le temps de fonctionnement en raison de problèmes de colmatage du médium filtrant. L'opération d'un filtre nécessiterait donc la mise en place de mesures visant à prévenir les baisses de conductivité hydraulique et par conséquent, les périodes de colmatage. Le lavage à contre-courant pourrait être un moyen de limiter l'accumulation des MES en surface du filtre, mais il implique l'élaboration de systèmes qui peuvent s'avérer coûteux.

3.4 Analyses économiques

Cette section touche l'évaluation des coûts d'immobilisation et d'opération encourus pour le traitement du lisier par séparation par flottation biologique. L'analyse économique est réalisée en dollar canadien (valeur de l'an 2002). Les hypothèses et les données nécessaires à l'estimation des coûts d'immobilisation et d'opération seront présentées dans un premier temps. Ensuite, les coûts des produits seront estimés. Enfin, les coûts totaux requis pour le traitement des lisiers de maternité, de pouponnière et d'engraissement seront détaillés.

En premier lieu, l'analyse économique sera réalisée pour un système de flottation à l'échelle de la ferme qui diffère du prototype à l'échelle pilote. Les coûts pour le traitement des lisiers de maternité, de pouponnière et d'engraissement seront estimés à partir des résultats obtenus lors des essais de flottation en mode continu à l'échelle du laboratoire et à l'échelle pilote. Les coûts d'immobilisation et d'opération seront évalués selon les hypothèses qui suivent :

- Porcherie : 2 000 porcs-espaces ;
- Nombre de jours de production : 350 jours (inclus 15 jours d'arrêt) ;
- Durée de vie utile des équipements : 15 ans ;
- Capital incluant les coûts d'acquisition et d'installation : 85 000 \$ (évaluation budgétaire) ;
- Équipements comptabilisés à neuf ;
- Coûts du capital : intérêts de 7 % composés annuellement pour une période de 5 ans ;
- Coûts d'entretien annuels : 3 % du capital ;
- Coûts d'énergie annuels : 104 kWh par jour cumulés sur 365 jours aux tarifs domestiques²⁴ (0,0597 \$ par kWh) ;
- Coûts de la main d'œuvre : un ouvrier agricole payé 18 \$ de l'heure pour 0,5 h de travail par jour pendant 350 jours ;
- Revenus ou coûts de disposition des sous-produits négligés.

Noter que les coûts d'immobilisation incluent les coûts d'acquisition et d'installation ainsi que les coûts du capital amortis sur la durée de vie utile et que les coûts d'opération comprennent les coûts d'entretien, d'énergie, de main d'œuvre et des produits.

En second lieu, l'évaluation des coûts des produits passe d'abord par la présentation des prix des polymères organiques sur le marché actuel tel que montrés au tableau suivant.

²⁴ Tout dépendant de la grosseur de l'entreprise agricole, les tarifs d'électricité peuvent être domestiques ou commerciaux. Pour les besoins du travail, les tarifs domestiques ont été retenus.

Tableau 36 Prix des polymères organiques utilisés pour la séparation du lisier de porc

Produit	Quantité	Prix (\$·kg ⁻¹)	Transport	Date
LPM 9511	800 kg	5,75	exclus	juin-01
	> 800 kg	5,25		
Zetag 7557 et Zetag 7654	standard	6,00 à 7,00 ^a	exclus	janv-02

^a Les prix varient de 6,00 à 7,00 \$·kg⁻¹ en fonction de la densité de charge du polymère.

Prendre note que les prix pour les polymères Zetag 7557 et Zetag 7654 peuvent être diminués pour des achats en grandes quantités.

Une fois les prix des polymères connus, il faut établir la consommation de polymère pour le traitement par séparation des lisiers de porc de maternité, de pouponnière et d'engraissement ainsi que les coûts à assumer pour l'utilisation des polymères. Ces résultats sont présentés dans un tableau à l'annexe E (tableau 67). Pour les essais en mode continu «LABCO» et «PILCO», les coûts des polymères varient peu en fonction du type de polymère utilisé et du lisier traité (de 1,01 à 1,31 \$·m⁻³). Ainsi, le coût de polymère moyen a été calculé et il s'élève à 1,16 \$·m⁻³. Noter que ce coût moyen est valable pour une concentration de polymère de 16 % v·v⁻¹.

En dernier lieu, les coûts d'immobilisation et d'opération ainsi que les coûts totaux requis pour le traitement des lisiers seront détaillés. La figure qui suit présente la variation de ces coûts en fonction du volume de lisier à traiter annuellement. Un exemple du calcul de ces coûts pour un volume annuel de lisier à traiter²⁵ de 5 000 m³·an⁻¹ est présenté à l'annexe E (tableau 69). Noter que les coûts d'immobilisation, d'entretien et de main d'œuvre sont majorés en fonction de l'augmentation du volume de lisier à traiter. Ainsi, à partir de 10 000

²⁵ Un volume annuel de lisier de 5 000 m³·an⁻¹ représente approximativement la production de lisier d'une porcherie de 2 000 porcs-espaces.

$\text{m}^3 \cdot \text{an}^{-1}$, les coûts d'immobilisation passent à 127 500 \$ et le temps de main d'œuvre s'élève à 0,63 h, alors qu'à partir de 15 000 $\text{m}^3 \cdot \text{an}^{-1}$, les coûts d'immobilisation et le temps de main d'œuvre sont estimés respectivement à 170 000 \$ et de 0,75 h.

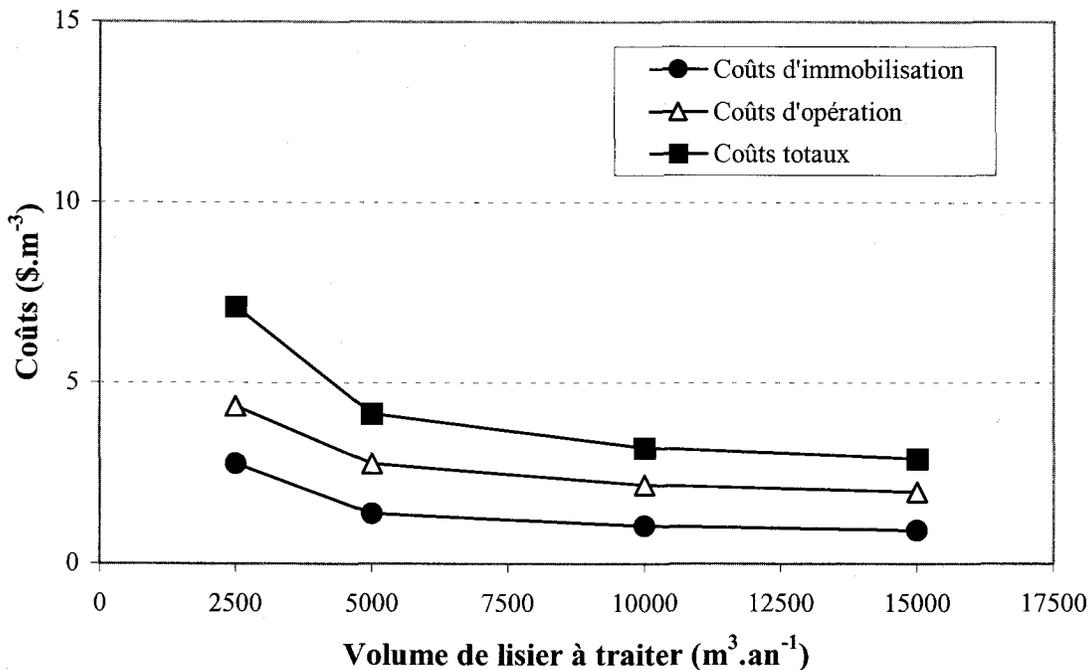


Figure 21 Variations des coûts pour le traitement du lisier de porc en fonction du volume annuel de lisier à traiter

Ainsi, les coûts d'immobilisation, d'opération et totaux diminuent avec l'augmentation des volumes de lisier à traiter. Les coûts totaux pour le traitement du lisier tombent sous la barre de 5 \$·m⁻³ de lisier traité à un volume d'environ 3 900 m³·an⁻¹. Les coûts totaux tendent à se stabiliser autour de 3 \$·m⁻³ de lisier traité à partir d'un volume d'environ 15 000 m³·an⁻¹ de lisier. En comparaison avec les coûts totaux des autres technologies commercialisables (section 1.6.6), les coûts totaux de traitement du lisier par séparation par flottation biologique se situent dans la catégorie inférieure à 5 \$·m⁻³ de lisier traité.

Le procédé de séparation par flottation biologique constitue la technologie de traitement la moins onéreuse.

Dès lors, il apparaît intéressant d'analyser les variations des coûts du traitement du lisier en fonction du capital investi, du temps de main d'œuvre nécessaire, du coût d'entretien et des concentrations de polymères utilisés. L'analyse de sensibilité est faite pour un volume annuel de lisier de $5\,000\text{ m}^3\cdot\text{an}^{-1}$ représentant approximativement la production de lisier d'une porcherie de 2 000 porcs-espaces. Des tableaux détaillés des résultats des analyses sont montrés à l'annexe E.

De prime abord, l'augmentation des coûts totaux engendrée par une hausse du capital investi de 42 500 \$ égalerait 23 % (tableau 71). Les coûts totaux s'élèveraient alors à $5,08\text{ \$}\cdot\text{m}^{-3}$ de lisier traité.

Ensuite, si pour diverses raisons le temps de main d'œuvre nécessaire augmentait de 0,5 h à 3,5 h, les coûts totaux pour le traitement du lisier varieraient de 4,14 à $7,92\text{ \$}\cdot\text{m}^{-3}$ de lisier traité (hausse de 91 %) (tableau 72).

Quant aux coûts d'entretien, une augmentation de 12 % des coûts totaux pour le traitement du lisier serait à prévoir pour une hausse des coûts d'entretien à 6 % du capital investi (tableau 73). Les coûts totaux s'élèveraient donc à $4,65\text{ \$}\cdot\text{m}^{-3}$ de lisier traité.

Enfin, pour une hausse de la concentration de polymère à $25\% \text{ v}\cdot\text{v}^{-1}$, la majoration des coûts totaux pour le traitement du lisier serait de 18 % (tableau 74). Les coûts totaux passeraient de 4,14 à $4,87\text{ \$}\cdot\text{m}^{-3}$.

En conclusion, le procédé de séparation par flottation biologique se positionne au rang de la technologie la moins coûteuse pour le traitement du lisier de porc avec des coûts totaux inférieures à $5\text{ \$}\cdot\text{m}^{-3}$ pour des volumes de lisier traités supérieurs à $3\,900\text{ m}^3\cdot\text{an}^{-1}$. Outre le volume de lisier traité, le temps de travail de la main d'œuvre apparaît être le paramètre le plus influent sur les coûts totaux. Suivent ensuite, en ordre décroissant, le capital investi, la concentration de polymère et les coûts d'entretien.



CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Les conclusions relatives au but et aux objectifs spécifiques de cette recherche seront énoncées dans un premier temps. Par la suite, les performances et les caractéristiques du procédé de traitement par séparation par flottation biologique seront comparées aux technologies concurrentes. Enfin, quelques recommandations pour des travaux futurs seront émises.

De prime abord, l'optimisation de la séparation de phases des lisiers de maternité, d'engraissement et de pouponnière a mené aux conclusions qui suivent. L'utilisation des boues rouges et de la poussière de sablage n'a pas été retenue. Les polymères cationiques apparaissent comme étant les meilleurs pour la séparation du lisier de porc. Le choix du polymère pour chaque type de lisier est : Zetag 7557 pour les lisiers de maternité et de pouponnière, et LPM 9511 pour le lisier d'engraissement. La concentration optimale de polymère à ajouter est d'environ 16 % v.v⁻¹. Le temps requis pour la flottation se situe entre 6 et 24 h. L'étude des gaz dégagés lors de la séparation par flottation biologique montre que le monoxyde de carbone, l'ammoniac, le sulfure d'hydrogène et le dioxyde de carbone sont détectés dans des proportions variables.

Quant aux conclusions des expérimentations du procédé de séparation pour des lisiers de maternité, d'engraissement et de pouponnière à l'échelle du laboratoire et à l'échelle pilote, elles démontrent qu'il est possible de séparer le lisier de porc par flottation pour diverses conditions (lisiers, temps de rétention, charges hydrauliques et en solides). Le mode de fonctionnement en continu tend à offrir des performances d'enlèvement comparables à celles du mode de fonctionnement en cuvée. Le critère du ratio $N-NH_4^+/P_t$ de la fraction liquide est respecté pour tous les essais. Pour ce qui est du critère de siccité de la fraction solide, il apparaît difficile à atteindre avec la présente configuration du flottateur. Enfin, en mode de fonctionnement continu, la stabilité des concentrations des paramètres de la fraction liquide et de la fraction solide en fonction du temps semble satisfaisante. Noter qu'il tend à y avoir des hausses de concentrations des ions solubles (NH_4^+ et PO_4^{3-}) pour le lisier d'engraissement. Les concentrations des matières en suspension tendent à être les plus

variables. Il importe de mentionner que le polissage de la fraction liquide sur filtre de tourbe a été exclu puisque premièrement, il n'apparaît pas nécessaire à l'atteinte du critère du ratio $N-NH_4^+/P_i$, et que deuxièmement, le filtre présente des problèmes d'opération (colmatage, faibles charges hydrauliques).

Enfin, les conclusions relatives aux coûts totaux encourus pour le traitement du lisier par flottation biologique démontrent qu'ils sont inférieurs à $5 \$ \cdot m^{-3}$ de lisier brut traité pour des volumes annuels de lisier supérieurs à $3\,900 m^3 \cdot an^{-1}$. Les coûts totaux semblent davantage influencés par les coûts de main d'œuvre.

En somme, le potentiel de la technologie de séparation du lisier porcin par flottation biologique est démontré. Le procédé de traitement par séparation permet d'extraire des fractions liquide et solide présentant un potentiel de valorisation favorable pour l'environnement.

Dans un second temps, il importe de situer le procédé de traitement en développement par rapport aux technologies concurrentes. Ainsi, la nature du procédé principal est physico-chimique puisqu'il s'agit d'une séparation jumelée à la floculation. Il y a bien entendu une part biologique étant donné que la flottation est provoquée biologiquement. L'application première du procédé est à l'échelle de la ferme (petite à moyenne) sans toutefois exclure l'intégration du procédé à une échelle régionale (usine centralisée). Le type de traitement fourni par le procédé en développement est partiel, mais suffisant pour faciliter la disposition des sous-produits. Enfin, au niveau des coûts totaux requis pour le traitement du lisier de porc, le procédé de séparation physico-chimique par flottation biologique se positionne en deçà des coûts totaux des autres technologies.

En ce qui a trait aux réponses du procédé de traitement aux critères d'évaluation des technologies, des répercussions positives sont anticipées à la suite des augmentations du ratio azote ammoniacal/phosphore total de la fraction liquide et de la siccité de la fraction solide. Au niveau environnemental et agronomique, la valeur fertilisante des sous-produits, le contrôle de la dose à épandre et le taux de demande des sous-produits pourraient être majorés. Il y aurait également réduction des impacts négatifs liés à la consistance des sous-

produits. Du point de vue technologique, l'adaptabilité au contexte québécois et à la gestion actuelle de la ferme, la simplicité d'opération du procédé et la disponibilité des polymères organiques utilisés confèreraient du potentiel au procédé. D'éventuels bénéfices liés aux coûts d'investissement et d'opération et aux volumes à gérer seraient envisageables au niveau économique. Enfin, les tensions sociales liées aux risques environnementaux pourraient s'amenuiser.

La technologie en développement présente, à ce stade-ci, les avantages et les inconvénients cités au tableau ci-contre.

Tableau 37 Avantages et inconvénients escomptés de la nouvelle technologie

Séparation physico-chimique par flottation biologique	
<u>Avantages :</u>	
<ul style="list-style-type: none"> • Efficacité pour des effluents chargés ($\geq 3\ 000\ \text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ DCO) ; • Diminution du phosphore et de l'azote ; • Concentration des ST, MES, DCO_t ; • Faibles coûts d'opération (sans apport d'oxygène). 	
<u>Inconvénients :</u>	
<ul style="list-style-type: none"> • Activités bactériennes réduites à basse température ; • Production de gaz à effets de serre (CO₂) ; • Effets inconnus des coagulants/floculants sur l'environnement et le rendement des cultures ; • Siccité limitée de la fraction solide. 	

Dans un troisième et dernier temps, les recommandations suivantes peuvent être émises quant au développement du procédé de séparation physico-chimique du lisier par flottation biologique :

- Accroître la siccité de la fraction solide en optant pour un mode de raclage intermittent et en améliorant la configuration du flottateur ;
- Approfondir les connaissances relatives aux gaz dégagés et aux processus biologiques, physiques ou chimiques sous-jacents à la séparation physico-chimique du lisier par flottation biologique afin de majorer la stabilité des performances de séparation dans le temps ;
- Poursuivre l'étude des performances du procédé de séparation en mode de fonctionnement continu pour les lisiers de maternité, de pouponnière et d'engraissement à l'échelle pilote et à l'échelle de la ferme.

RÉFÉRENCES

- Aarnink, A.J.A., A. Keen, J.H.M. Metz, L. Speelman et M.W.A. Verstegen (1995). Ammonia emission patterns during the growing periods of pigs housed on partially slatted floors. *J. Agr. Eng. Res.*, 62 : 105-116.
- Abdelmagid, H.M. et M.A. Tabatabai (1982). Decomposition of acrylamide in soils. *J. Environ. Qual.*, 11 : 701-704.
- APHA (1995). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. New York, American Public Health Association.
- ApSimon, H.M. et M. Kruse-Plass (1991). The role of ammonia as an atmospheric pollutant. Dans : *Odour and Ammonia Emissions From Livestock Production*, Nielsen V.C., J.H. Voorburg et P. L'Hermite (Eds), 17-20. Silsoe, Angleterre, 26-28 mars. Angleterre : Elsevier Applied Science Publisher.
- Aquatech Société de gestion de l'eau (1984). *Traitement du lisier de porc : Évaluation du traitement par coagulation-décantation*. Québec, Aquatech Société de gestion de l'eau, 339 p. [Rapport interne no. RD-85-08, Envirodoq 850304]
- Aquatech Société de gestion de l'eau (1987). *Valorisation du lisier de porc par le procédé EPCO de production de protéine : Rapport synthèse et rapport final*. Québec, Ministère de l'Environnement et de la faune, 75 p.
- Arogo, J., R.H. Zhang, G.L. Riskowski et D.L. Day (2000). Hydrogen sulfide production from stored liquid swine manure : A laboratory study. *Transactions of the ASAE*, 43 (5) : 1241-1245.
- ASTM (1995). *Annual Book of ASTM Standards : Section 4 Construction : Soil and Rock (I)*. Philadelphie, American Society for Testing and Materials, 984 p.

- Bailey, L., B. Bowman, K. Buckley, R. Bush, R. Eilers, D. Massé, J.W. Paul, V. Rodd et R. Simard (1998). *Stratégie de recherche sur la gestion du lisier de porc au Canada*. Ottawa, Agriculture et agroalimentaire Canada, 23 p.
- Banton, O., M. Larocque, J.-L. Sasseville, J. Lareau, J. Nolet et G. Gagné (1994). *Méthode de détermination des droits de pollution : Formulation des relations doses-réponses : Méthodologie d'évaluation et choix stratégiques dans la gestion des surplus de fumiers et lisiers*. Sainte-Foy, INRS-Eau, 71 p. (Rapport de recherche No 374, 3)
- Barrington, S.F. et R.G. Moreno (1995). Swine manure nitrogen conservation in storage using sphagnum moss. *J. Environ. Qual.*, 24 : 603-607.
- Barton P., M. Buggy, S. Deane, J. Kelly et H.J. Lyons (1984). Some Applications of Irish Moss Peat in Effluent Treatment. Dans : *Proceedings of the Seventh International Peat Congress*. Irish National Peat Committee (éd.), 2 : 148-156. Dublin, Irlande, 18-23 juin. Irlande : Irish National Peat Committee.
- Barvenik, F.W. (1994). Polyacrilamide characteristics related to soil applications. *Soil Sci.*, 158 : 235-243.
- Bélangier, A. et G. Buelna (1990). Biofiltration à base de tourbe : Une alternative prometteuse pour l'assainissement individuel. Dans : *13^{ième} Symposium international sur le traitement des eaux usées*, Environnement Canada (éd.), 13 : 343-350. Montréal, Canada, 14-15 novembre. Canada : Environnement Canada.
- Bisaillon, J.-G., R. Beaudet, M. Sylvestre, M. Ishaque, A. Morin, E. Di Franco et A.-M. Guérin (1984). Aspects microbiologiques du lisier de porc. *Sciences et techniques de l'eau*, 17 (4) : 397-400.

- Bisaillon, J.-G., R. Beaudet, M. Ishaque et M. Sylvestre (1985). Développement sur le traitement microbiologique du lisier de porc. Dans : *Premier colloque sur la recherche et le développement en traitement et valorisation du fumier au Québec*. Ministère de l'environnement (éd.), 107-120. Québec, Canada, 31 octobre. Canada : Ministère de l'environnement.
- Blais, J.-F. et R.D. Tyagi (2000). *Assainissement des eaux usées : Cours Eau-411*. Ste-Foy, INRS-Eau, 411 p.
- Bolto, B.A., D.R. Dixon, S.R. Gray, H. Chee, P.J. Harbour, L. Ngoc et A.J. Ware (1996). The use of soluble organic polymers in waste treatment. *Water Sci. Technol.*, 34 (9) : 117-124.
- Brooks, J.L. et L.M. Zibilske (1983). Fungi isolated from the sphagnum peat wastewater treatment system. Dans : *Proceedings International Symposium on Peat Utilization*, C.H. Fuchsman et S.A. Spigarelli (Eds), 381-388. Minnesota, États-Unis, 10-13 octobre. États-Unis : C.H. Fuchsman et S.A. Spigarelli.
- Brooks, J.L., C.A. Rock et R.A. Struchtemeyer (1984). Use of peat for on-site wastewater treatment : Field studies. *J. Environ. Qual.*, 13 : 524-530.
- Brown, L., K.C.C. Bancroft et M.M. Rhead (1980). Laboratory studies on the adsorption of acrylamide monomer by sludge, sediments, clays, peat and synthetic resins. *Water Res.*, 14 : 779-781.
- Buelna, G. et G. Bélanger (1989). Performance épuratoire d'un biofiltre à base de tourbe utilisé pour le traitement des eaux usées de petites municipalités. Dans : *12^{ième} Symposium international sur le traitement des eaux usées*, Ministère de l'environnement (éd.), 1-15. Montréal, Canada, 22 novembre. Canada : Ministère de l'environnement.
- Burton, C.H. (1992). A review of the strategies in the aerobic treatment of pig slurry : Purpose, theory and method. *J. Agr. Eng. Res.*, 53 : 249-272.

- Chynoweth, D.P. et P. Pullammanappallil (1996). *Microbiology of Solid Waste : Anaerobic Digestion of Solid Wastes*. Boca Raton, CRC Press, 224 p.
- Chynoweth, D.P., A.C. Wilkie et J.M. Owens (1999). Anaerobic treatment of piggery slurry : Review. *Asian-Aus. J. Anim. Sci.*, 12 (4) : 607-628.
- Coillard, J. (1990). Le traitement des lisiers de porcs excédentaires. *Courant*, 2 : 40-48.
- Côté, D., T.S. Tran et A. N'Dayégamiyé (1996). Efficacité fertilisante du lisier de porc épandu en postlevée du maïs. *Agrosol*, 9 (1) : 14-20.
- Couillard, D. (1983). Déphosphatation des eaux à l'aide de déchets provenant des industries de la réduction de l'aluminium. *Eau du Québec*, 16 (1) : 34-37.
- Couillard, D. (1992). Appropriate wastewater management technologies using peat. *J. Environ. Syst.*, 21 : 1-19.
- Couillard, D. (1994). Review : The use of peat in wastewater treatment. *Water Res.*, 28 (6) : 1261-1274.
- Cournoyer, M.S., F. Granger, R. Choquette et G. Barnett (1998). *Effet de l'utilisation des trémières-abreuvoirs et des bols-abreuvoirs sur la production de lisier de porcs en engraissement : Rapport final*. Saint-Charles-sur-Richelieu, Urgel Delisle & associés, 102 p.
- CPVQ (1996). *Grilles de référence en fertilisation*. Québec, Conseil des productions végétales du Québec, 128 p.
- CRIQ (1994). *Caractérisation de certains composts commerciaux disponibles au Québec*. Ste-Foy, Centre de recherche industrielle du Québec, 19 p.
- Croll, B.T., B.M. Arkeil et R.P.J. Hodge (1974). Residues of acrylamide in water. *Water Res.*, 8 : 989-993.
- Degrémont (1989). *Mémento technique de l'eau : Tome 1*. Rueil-Malmaison, Degrémont, 592 p.

- Donham, K.J. (2000). The concentration of swine production : Effects on swine health, productivity, human health, and the environment. *Veterinary Clinics of North America : Food Animal Practice*, 16 (3) : 559-597.
- Doucet, R. (1992). *La science agricole*. Eastman, Éditions Berger, 699 p.
- Drolet, J.-Y. et D. Gilbert (2000). *Le Portrait agroenvironnemental des fermes du Québec : Rapport sectoriel : Porcs*. Longueuil, Union des producteurs agricoles, Ministère de l'agriculture, des pêcheries et de l'alimentation du Québec, 129 p.
- Dutil, C., J.-Y. Drolet, G. Gagné et J.-L. Sasseville (1994). *L'évaluation des technologies de gestion du lisier de porcs dans le cadre de l'établissement d'une politique de contrôle de la pollution provenant des production animales : Méthodologie d'évaluation et choix stratégiques dans la gestion des surplus de fumiers et lisiers*. Sainte-Foy, INRS-Eau, 79 p. (Rapport de recherche No 374, 5)
- Entry, J.A. et R.E. Sojka (2000). The efficacy of polyacrylamide and related compounds to remove microorganisms and nutrients from animal wastewater. *J. Environ. Qual.*, 29 : 1905-1914.
- FPPQ. *Fédération des producteurs de porcs du Québec*, [En ligne]. <http://www.leporcduquebec.qc.ca/indexfed.html> (Page consultée le 19 février 2002).
- Francoeur, L.-G. (2001). Du cochon «au noir» au porc «vert». *Le Devoir*. 5 février 2001.
- Gangbazo, G., D. Cluis et C. Bernard (1999). Connaissances acquises en pollution diffuse agricole au Québec 1993-1998 : Analyse et perspectives. *Vecteur environnement*, 22 (4) : 36-45.
- Gao, Y.C., P.H. Liao et K.V. Lo (1993). Chemical treatment of swine wastewater. *J. Environ. Sci. Health*, A28 (4) : 795-807.

- Gingras, G., D. Bernier, J.-G. Bisailon, G. Gagné, S. Godbout, J. Leclair, A. Marquis, D. Massé, D. Naud, S. Pigeon, P. Vallée et S. Richard (1998). *Plan agroenvironnemental de la production porcine : Rapport du groupe de travail «Transfert technologique» : Évaluation des techniques et technologies alternatives de gestion et de traitement du lisier de porc*. Longueuil, Fédération des producteurs de porcs du Québec, 38 p.
- Gingras, G., R. Beudet, D. Bernier, D. Côté, C. Foulds, S. Godbout, A. Marquis, D. Naud, S. Pigeon., S. Proulx, S. Quessy, P. Rochette et P. Vallée (2001). *Rapport d'évaluation des technologies de gestion et de traitement du lisier de porc*. Longueuil, Fédération des producteurs de porcs du Québec, 46 p.
- Giroux, M., D. Carrier et P. Beudet (1996). Problématique et méthodes de gestion des charges de phosphore appliquées aux sols agricoles en provenance des engrais de ferme. *Agrosol*, 9 (1) : 36-45.
- Gordon, R.L. et S. Rhodes (1993). Injuries to workers in a swine confinement facility. *J. Occup. Environ. Med.*, 35 : 518-521.
- Gravelle, D.V. et A. Landreville (1980). Caractérisation de la tourbe pour le traitement des eaux usées d'abattoirs. *Can. J. Chem. Eng.*, 58 : 235-240.
- Henriksen, K., L. Berthelsen et R. Matzen (1998). Separation of liquid pig manure by flocculation and ion exchange : Part 1 : Laboratory experiments. *J. Agr. Eng. Res.*, 69 : 115-125.
- Hickey, R.F. et M.S. Switzenbaum (1991). The response and utility of hydrogen and carbon monoxide as process indicators of anaerobic digesters subject to organic and hydraulic overloads. *J. Water Pollut. Control Fed.*, 63 : 129.
- Hill, D.T. et E.W. Tollner (1980). Chemical and physical properties of flushed swine waste after screening. *ASAE Paper*, 80 : 4056.

- Imbeault, S. (2001). *Traitement du lisier de porc par flottation biologique et filtration sur tourbe*. Ste-Foy, INRS-Eau, 30 p.
- Jaulin, L. et Y. Bernard (1993). *Gestion solide/liquide du lisier de porc : Étude sur les séparateurs à lisier : Rapport final*. Sainte-Foy, Centre de recherche industrielle du Québec, 27 p.
- Jones, D.D., C.C Barker, R. George et R. Smith (1982). *Flushing Systems for Swine Buildings : Pork Industry Handbook*. Kentucky, University of Kentucky, 5 p.
- Kalyuzhnyi, S., V. Sklyar, V. Fedorovich, A. Kovalev, A. Nozhevnikova et A. Klapwijk (1999). The development of biological methods for utilisation and treatment of diluted manure streams. *Water Sci. Technol.*, 40 (1) : 223-229.
- Kirchmann, H. et E. Witter (1992). Composition of fresh, aerobic and anaerobic farm animal dung. *Bioresource Technology*, 40 : 137-142.
- Lalonde, Girouard, Letendre et Ass. (1990). *Analyse de la situation des surplus de lisier de la région de la Yamaska : Rapport final*. Montréal, Lalonde, Girouard, Letendre et Ass., 110 p.
- Lavoie, S., M.C. Nolin et J.-L. Sasseville (1994). *Classification des terres agricoles selon leurs aptitudes physiques à recevoir des engrais de ferme à l'aide d'un système expert : Méthodologie d'évaluation et choix stratégiques dans la gestion des surplus de fumiers et lisiers*. Sainte-Foy, INRS-Eau, 124 p. (Rapport de recherche No 374, 4)
- Leblanc, D. (2001). *Stabilisation et séparation physico-chimique du lisier de porc avec polissage sur filtre de tourbe*. Ste-Foy, INRS-Eau, 22 p.
- Leduc, R. (1998). *Conception épuration des eaux municipales : Notes de cours (complément au livre de Qasim)*. Sherbrooke, Université de Sherbrooke, 108 p.

- LeDuy, A., J. Thibault et L. Cournoyer (1987). *Essais de pullulane comme flocculant et des chocs de température pour la séparation solide-liquide du lisier de porc*. Sainte-Foy, Université Laval, 127 p. [Rapport no. RD-87-01, Envirodoq 870070]
- Lemelin, M., R. Fillion et T.L. Simard (1992). La gestion de l'alimentation du porc : Un moyen efficace de réduction des effluents et du volume de lisier. Dans : *Colloque sur la gestion de fumiers : Rien ne se perd, rien ne se crée*, Conseil des productions végétales du Québec (éd.). Drummondville, Canada, 20-21 octobre. Canada : Ministère de l'agriculture, des pêcheries et de l'alimentation.
- Les Consultants BPR (1994). *Étude des solutions de rechange à la gestion sous forme liquide des déjections de porcs*. Québec, Ministère de l'environnement et de la faune, 322 p.
- Maheux, B., Y. Paquin, B. Marinier, M. Savard et R. Dumas (1996). *Valorisation du lisier de porc et des résidus des scieries de la MRC de la Mitis : Rapport final*. Rimouski, UQAR, 48 p. [no. EE-43-780-537-226, no. 22-873-257-01015]
- Mahon, M. et J. Jackson (1995). *Occupational Health and Safety for the Australian Pig Industry : Part 1 : Literature Review*. Brisbane, Queensland Farmer's Federation.
- MAPAQ (1999). *Fumier de ferme : Production*, Québec, Groupe Géagri, 6 p. (Agdex 538, 400.27)
- Massé, D.I. (1995). *Psychrophilic anaerobic digestion of swine manure slurry in intermittently fed sequencing batch reactors : Ph. D. Thesis*. Ottawa, University of Ottawa, 271 p.
- Massé, D.I. et R.L. Droste (1997). Microbial interaction during the anaerobic treatment of swine manure slurry in a sequencing batch reactor. *Can. Agr. Eng.*, 39 (1) : 35-41.
- Massé, D.I., D. Lu, L. Masse et R.L. Droste (2000a). Effect of antibiotics on psychrophilic anaerobic digestion of swine manure slurry in sequencing batch reactors. *Bioresource Technology*, 75 : 205-211.

- Massé, D.I. et R.L. Droste (2000b). Comprehensive model of anaerobic digestion of swine manure slurry in a sequencing batch reactor. *Water Res.*, 34 (12) : 3087-3106.
- McCollister, D.D., C.L. Hake, S.E. Sadek et V.K. Rowe (1965). Toxicologic investigations of polyacrylamides. *Toxicol. Appl. Pharmacol.*, 7 : 639-651.
- Mels, A.R., W.H. Rulkens, A.K. van der Meer, A.F. van Nieuwenhuijzen et A. Klapwijk (2001). Flotation with polyelectrolytes as a first step of a more sustainable wastewater treatment plant. *Wat. Sci. Tech.*, 43 (11) : 83-90.
- Muehling, A.J. (1970). Gases and odors from stored swine waste. *J. Anim. Sci.*, 30 : 526-530.
- Narasiah, K.S. et L. Hains (1988). Tertiary treatment of aerated lagoon effluents by sphagnum peat moss : Laboratory studies. *Environ. Technol. Lett.*, 9 : 1213-1222.
- Ni, J.Q., C. Vinckier, J. Hendriks et J. Coenegrachts (1999). Production of carbon dioxide in a fattening pig house under field conditions : II. Release from the manure. *Atmospheric Environment*, 33 : 3697-3703.
- Nichols, D.S. (1983). Capacity of natural wetlands to remove nutrients from wastewater. *J. Water Pollut. Control Fed.*, 55 : 495-505.
- Nichols, D.S., D. Prettyman et M. Gross (1983). Movement of bacteria and nutrients from pit latrines in the boundary waters canoe area wilderness. *Water Air Soil Pollut.*, 20 : 171-180.
- Nitcheu, G.C. (1997). *Traitement et valorisation du lisier de porc : Mémoire pour le diplôme d'études supérieures spécialisées : Eau-Santé-Environnement*. Sainte-Foy, INRS-Eau, 48 p.
- Noren, O. (1986). Design and use of biofilters for livestock buildings. Dans : *Odour Prevention and Control of Organic Sludge and Livestock Farming*, Nielsen V.C., J.H. Voorburg et P. L'Hermitte (Eds), 234-237. Londres, Angleterre, 15-19 avril. Angleterre : Elsevier Applied Science Publishers.

- Nozhevnikova, A.N., O.R. Kotsyurbenko et S.N. Parshina (1999). Anaerobic manure treatment under extreme temperature conditions. *Water Sci. Technol.*, 40 (1) : 215-221.
- Painchaud, J. (1997). *La qualité de l'eau des rivières du Québec : États et tendances*. Québec, Ministère de l'environnement et de la faune, 57 p. [Rapport no EN970111]
- Potvin, D. et Y. Bernard (1995). *Recherche de techniques de compostage adaptées à une gestion optimale des fumiers : Rapport final*. Sainte-Foy, Centre de recherche industrielle du Québec, 334 p.
- Quasim, S.R. (1994). *Wastewater Treatment Plants : Planning, Design and Operation*. Lancaster, Technomic Publishing Company, 726 p.
- Rana S. et T. Viraraghavan (1987). Use of peat in septic tank effluent treatment : Column studies. *Water Pollut. Res. J. Can.*, 22 : 491-504.
- Roberge, G. (1992). *Augmentation de l'efficacité de déphosphatation d'un filtre multi-média à base de tourbe par addition d'un agent dopant : Mémoire de maîtrise*. Sainte-Foy, INRS-Eau, 164 p.
- Roberge, G., J.-F. Blais et G. Mercier (1999). Enlèvement du phosphore des eaux usées par traitement à base de tourbe dopée aux boues rouges. *Can. J. Chem. Eng.*, 77 : 1185-1194.
- Roche Groupe Conseil (1984). *Amélioration et démonstration du procédé de compostage du lisier de porc : Projet de recherche et de développement*. Sainte-Foy, Roche Groupe Conseil, 215 p.
- Rothwell, E. (1974). Manufacture and quality control of synthetic flocculents. *Water Treatment Exam.*, 23 : 372-376.

- Saiki Y., S. Imabayashi, C. Iwabuchi, Y. Kitagawa, Y. Okumura et H. Kawamura (1999). Solubilization of excess activated sludge by self-digestion. *Water Res.*, 33 (8) : 1864-1870.
- Schiffman, S.S., E.A. Miller, M.S. Suggs et B.G. Graham (1995). The effect of environmental odors emanating from commercial swine operations on the mood of nearby residents. *Brain Res. Bull.*, 37 : 369-375.
- Sievers, D.M., M.W. Jenner et M. Hanna (1994). Treatment of dilute manure wastewaters by chemical coagulation. *Transactions of the ASAE*, 37 (2) : 597-601.
- Simard, R.R., D. Cluis et G. Gangbazo (1993). Animal unit density and P loads in soils of Beaurivage watershed. *Can. J. Soil Sci.*, 73 (4) : 653.
- Simard, R.R., D. Cluis, G. Gangbazo et S. Beauchemin (1995). Phosphorus status of forest and agricultural soils from a watershed of high animal density. *J. Environ. Qual.*, 24 (5) : 1010-1017.
- Spoelstra, S.F. (1978). Degradation of tyrosine in anaerobically stored piggery wastes and in pig feces. *Appl. Environ. Microbiol.*, 36 : 631-638.
- Spoelstra, S.F. (1980). Origin of objectionable odorous components in piggery wastes and the possibility of applying indicator components for studying odor development. *Agr. Environ.*, 5 : 241-260.
- Stumm, V. et C.R. O'Melia (1968). Stoichiometry of coagulation. *J. Am. Water Works Assoc.*, 60 (5) : 514-539.
- Svoboda, I.F. et A. Jones (1999). Waste management for hog farms : Review. *Asian-Aus. J. Anim. Sci.*, 12 (2) : 295-304.
- Tchobanoboulos, G. et E.D. Schroeder (1987). *Water Quality : Characteristics, Modeling, Modification*. Don Mills (Can.), Addison-Wesley Publishing Company, 768 p.

- Theobald, O. (1992). *Les traitements du lisier de porc à la ferme : Tome I : Synthèse bibliographique*. Paris, Institut Technique du Porc, 50 p.
- Thomas, W.M. (1964). Acrylamide polymers. *Encyclopedia Polym. Sci. Technol.*, 1 : 177-197.
- Tran, T.S., D. Côté et A. N'Dayegamiye (1996). Effets des apports prolongés de fumier et de lisier sur l'évolution des teneurs du sol en éléments nutritifs majeurs et mineurs. *Agrosol*, 6 (1) : 21-30.
- Tremblay, A., J.-F. Blais, G. Mercier, M. Chartier, G. Roberge et R.D. Tyagi (1999). Étude du traitement en RBS du lisier de porc séparé. Dans : *14^{ième} Congrès régional de l'Est du Canada de l'Association canadienne sur la qualité de l'eau (ACQE)*, AQTE, 44. Sherbrooke, Canada, 5 novembre. Canada : Association québécoise des techniques de l'eau.
- Vanotti, M.B. et P.G. Hunt (1999). Solids and nutrient removal from flushed swine manure using polyacrylamides. *Transactions of the ASAE*, 42 (6) : 1833-1840.
- Viraraghavan, T. et A. Ayyaswami (1987). Use of peat in water pollution control : A review. *Can. J. Civil Eng.*, 14 : 230-233.
- Viraraghavan, T. et S.R. Kikkeri (1988). Peat filtration of food-processing wastewaters. *Biol. Waste*, 26 : 151-155.
- Voermans, J.A.M. et J.P.L. Kleijn (1988). Separation of pig slurry by sedimentation. Dans : *Storing, Handling and Spreading of Manure and Municipal Waste*, Research Inst. For Pig Husbandry (éd.). Uppsala, Suède, 20-22 septembre. Pays-Bas : Research Inst. For Pig Husbandry.
- Wallace, A. et G.A. Wallace (1986). Effects of soil conditioners on emergence and growth of tomato, cotton, and lettuce seedlings. *Soil Sci.*, 141: 313-316.

- Westerman, P.W., J.R. Bicudo et A. Kantardjieff (2000). Upflow biological aerated filters for the treatment of flushed swine manure. *Bioresource Technology*, 74 : 181-190.
- Zhang, R.H. et F. Lei (1998). Chemical treatment of animal manure for solid-liquid separation. *Transactions of the ASAE*, 41 (4) : 1103-1108.
- Zhu, J. et L.D. Jacobson (1999). Correlating microbes to major odorous compounds in swine manure. *J. Environ. Qual*, 28 (3) : 737-744.
- Ziegler, D. et M. Heduit (1991). *Engrais de ferme, valeur fertilisante, gestion, environnement*. Paris, Institut technique du porc (ITP), Institut technique des céréales et des fourrages (ITCF) et Institut technique de l'élevage bovin (ITEB), 35 p.



ANNEXE A

Démonstration de l'équation de Stokes

La démonstration de l'équation de Stokes provient de la théorie de la sédimentation développée dans le livre de Tchobanoboulos et Schroeder (1987). La démonstration est complétée par des informations provenant des documents de Leduc (1998) et de Degremont (1989) qui stipulent que cette équation est également applicable à la flottation.

Expression mathématique de la vitesse de sédimentation

Trois forces sont sollicitées lors de la sédimentation d'une particule : la force gravitationnelle, la poussée d'Archimède et la force de traînée.

Hypothèses :

- Système idéalisé : particule mue par un mouvement horizontal (courant) et un mouvement vertical (gravité) ;
- Particule unitaire : aucune interaction entre particules.

Selon la deuxième loi de Newton,

Équation 4 Deuxième loi de Newton appliquée à la sédimentation d'une particule

$$F_G - F_A - F_T = m_p \frac{dv_s}{dt}$$

Où

m_p	=	masse de la particule, kg
v_s	=	vitesse de sédimentation de la particule, $m \cdot s^{-1}$
F_G	=	force gravitationnelle, N
F_A	=	poussée d'Archimède, N
F_T	=	force de traînée, N

En supposant qu'un état d'équilibre s'instaure rapidement dans un système idéalisé, la vitesse de sédimentation s'uniformise et le terme de l'accélération devient nul. Ainsi,

Équation 5 Deuxième loi de Newton simplifiée

$$F_G - F_A - F_T = 0$$

D'une part, la force gravitationnelle nette est donnée par l'équation suivante,

Équation 6 Force gravitationnelle nette

$$F_G - F_A = (\rho_p - \rho_l)gV_p$$

Où $\rho_p =$ densité de la particule, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
 $\rho_l =$ densité du liquide, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
 $g =$ accélération gravitationnelle, $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$
 $V_p =$ volume de la particule, m^3

D'autre part, la force de traînée s'exprime comme suit,

Équation 7 Force de traînée

$$F_T = C_T A_p \rho_l \frac{v_s^2}{2}$$

Où $C_T =$ coefficient de traînée, sans dimension
 $A_p =$ surface transversale de la particule, m^2
 $\rho_l =$ densité du liquide, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
 $v_s =$ vitesse de sédimentation de la particule, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

En substituant les équations 6 et 7 dans l'équation 5, il est possible de déduire une expression mathématique de la vitesse de sédimentation d'une particule sphérique.

Équation 8 Vitesse de sédimentation d'une particule sphérique

$$v_s = \sqrt{\frac{4g(\rho_p - \rho_l)d_p}{3C_T\rho_l}}$$

Où $d_p =$ diamètre de la particule, m

Particularités du coefficient de traînée C_T

Avant de parvenir à la forme simplifiée de l'équation 8, il importe de s'attarder au terme du coefficient de traînée qui est dépendant de la forme, de la taille et du régime hydraulique de la particule. Le nombre de Reynolds, ratio des forces d'inertie par rapport aux forces de viscosité, permet de qualifier le régime hydraulique (Leduc, 1998). Le nombre de Reynolds se définit comme suit,

Équation 9 Nombre de Reynolds

$$N_R = \frac{\rho v_s d_p}{\eta}$$

Où $N_R =$ nombre de Reynolds, sans dimension
 $\eta =$ viscosité dynamique du liquide, $N \cdot s \cdot m^{-2}$

Le tableau suivant présente les expressions mathématiques menant à l'obtention d'une estimation de la valeur numérique du coefficient de traînée (Degrémont, 1989). Noter qu'il existe des variantes selon les auteurs.

Tableau 38 Valeurs du coefficient de traînée pour différents régimes hydrauliques

Régime	N_R	C_T	Formule
Laminaire	$10^{-4} < N_R < 1$	$24N_R^{-1}$	Stokes
Intermédiaire	$1 < N_R < 10^3$	$18,5N_R^{-0,06}$	Allen
Turbulent	$10^3 < N_R < 2 \cdot 10^5$	0,44	Newton

Autre point à considérer pour le coefficient de traînée : le facteur de sphéricité ψ . Ce facteur met en relation le volume de la sphère de même surface par rapport au volume de la particule. Il affecte une correction au coefficient de traînée pour une particule autre que sphérique. Ainsi,

Équation 10 Coefficient de traînée corrigée par un facteur de sphéricité

$$C_T' = \psi C_T$$

Différentes valeurs du facteur de sphéricité (Degremont, 1989) sont présentées dans le tableau qui suit :

Tableau 39 Valeurs du facteur de sphéricité

Particules	Facteurs de sphéricité
Sable	2
Charbon	2,25
Talc	3,25
Gypse	4
Lamelles de graphite	22
Mica	170

Loi de Stokes

En tenant compte des informations précédentes, l'équation 8 prend la forme suivante pour un régime laminaire,

Équation 11 Vitesse de sédimentation d'une particule sphérique simplifiée

$$v_s = \frac{g(\rho_p - \rho_w)d_p^2}{18\eta}$$

L'équation 11 correspond à l'équation de Stokes. Il importe de rappeler les conditions d'application de cette équation :

- Particule sphérique unitaire ;
- Régime hydraulique laminaire.

ANNEXE B

Résultats des essais de séparation

Résultats des essais de flottation en colonnes

Les tableaux qui suivent présentent les résultats des essais COL01, COL02 et COL03. Le ratio S/L est donné pour un laps de temps de 48 h. Les chiffres entre parenthèses correspondent aux pourcentages d'enlèvement des nutriments et de la DCO_t qui ont été calculés de la façon suivante :

Équation 12 Pourcentage d'enlèvement des nutriments et de la DCO_t

$$\%Enl. = \frac{(C_{LB} - C_{FL})}{C_{LB}} * 100$$

Où C_{LB} = Concentration du lisier brut
C_{FL} = Concentration de la fraction liquide

Tableau 40 Synthèse des résultats de l'essai COL01 ; lisier de maternité ; Zetag 7654

Conc. p (% v.v ⁻¹)	LB	0	5	10	20	35	50
S/L _{48h}	-	-0,2	-0,2	-0,2	0,5	0,5	0,2
Fraction solide							
ST (%)	1,2	8,1	8,9	7,7	12,0	13,7	8,5
Fraction liquide							
P _t (mg P.l ⁻¹)	689	378 (45) ^a	259 (62)	185 (73)	183 (73)	127 (82)	162 (76)
PO ₄ ³⁻ (mg P.l ⁻¹)	155	139 (10)	135 (13)	120 (23)	115 (26)	97 (37)	86 (44)
N _{NTK} (mg N.l ⁻¹)	2 380	2 150 (10)	2 170 (9)	2 660 (-12)	1 550 (35)	1 440 (40)	1 210 (49)
NH ₄ ⁺ (mg N-NH ₄ ⁺ .l ⁻¹)	2 160	2 130 (1)	2 110 (2)	1 830 (15)	1 660 (23)	1 340 (38)	1 030 (52)
DCO _t (mg.l ⁻¹)	23 700	22 700 (4)	14 600 (38)	13 600 (42)	9 260 (61)	7 810 (67)	6 910 (71)
N-NH ₄ ⁺ /P _t	3	6	8	10	9	11	6

^a Les chiffres entre parenthèses correspondent aux pourcentages d'enlèvement (% Enl.) de chacun des paramètres.

Tableau 41 Synthèse des résultats de l'essai COL02 ; lisier de maternité ; Zetag 7557

Conc. P (% v.v ⁻¹)	LB	0	5	10	20	35	50
S/L _{48 h}	-	-0,2	-0,2	0,2	0,3	0,1	0,1
Fraction solide							
ST (%)	1,6	7,2	6,3	9,6	9,5	9,4	8,7
Fraction liquide							
P _t (mg P·l ⁻¹)	667	305 (54) ^a	259 (61)	216 (68)	206 (69)	176 (74)	133 (80)
PO ₄ ³⁻ (mg P·l ⁻¹)	150	142 (6)	137 (9)	133 (12)	126 (16)	101 (33)	79 (47)
N _{NTK} (mg N·l ⁻¹)	2 590	2 150 (17)	1 980 (24)	1 680 (35)	1 640 (37)	1 400 (46)	1 090 (58)
NH ₄ ⁺ (mg N-NH ₄ ⁺ ·l ⁻¹)	2 040	2 150 (-5)	2 080 (-2)	1 900 (7)	1 750 (14)	1 350 (34)	956 (53)
DCO _t (mg·l ⁻¹)	24 900	18 300 (26)	12 600 (49)	11 100 (55)	9 460 (62)	7 530 (70)	6 250 (75)
N-NH ₄ ⁺ /P _t	3	7	8	9	9	8	7

^a Les chiffres entre parenthèses correspondent aux pourcentages d'enlèvement (% Enl.) de chacun des paramètres.

Tableau 42 Synthèse des résultats de l'essai COL03 ; lisier de maternité ; Zetag 7557

Conc. p (% v.v ⁻¹)	LB	0	5	10	20	35	50
S/L _{48h}	-	-0,7	-2,2	-3,0	5,6	3,2	-3,6
Fraction solide							
ST (%)	5,1	11,4	10,1	10,0	11,3	8,6	4,6
Fraction liquide							
P _t (mg P·l ⁻¹)	583	287 (51) ^a	272 (53)	292 (50)	255 (56)	205 (65)	83 (86)
PO ₄ ³⁻ (mg P·l ⁻¹)	155	132 (15)	137 (12)	168 (-8)	138 (11)	110 (29)	66 (57)
N _{NTK} (mg N·l ⁻¹)	2 540	2 080 (18)	1 990 (22)	1 920 (24)	1 670 (34)	1 370 (46)	657 (74)
NH ₄ ⁺ (mg N-NH ₄ ⁺ ·l ⁻¹)	2 250	2 060 (8)	2 030 (10)	1 840 (18)	1 690 (25)	1 310 (42)	824 (63)
DCO _t (mg·l ⁻¹)	65 200	20 000 (69)	20 100 (69)	20 900 (68)	14 500 (78)	9 730 (85)	6 320 (90)
N-NH ₄ ⁺ /P _t	4	7	7	6	7	6	10

^a Les chiffres entre parenthèses correspondent aux pourcentages d'enlèvement (% Enl.) de chacun des paramètres.

ANNEXE C

Résultats des essais de flottation à l'échelle du laboratoire

Résultats des essais en mode cuvée

Les tableaux qui suivent présentent les caractéristiques du lisier brut et des fractions liquide et solide recueillies lors des essais LABCU01 et LABCU02. Les valeurs entre parenthèses situées sous les valeurs des concentrations des fractions liquides correspondent aux pourcentages d'enlèvement qui ont été calculés de la même façon qu'à l'annexe B (équation 12).

Tableau 43 Caractéristiques du lisier brut (LB) et de la fraction liquide (FL) résultant de traitements en mode cuvée ; lisier de maternité ; Zetag 7557

Paramètres	LABCU01		LABCU02	
	LB	FL	LB	FL
Polymère (% v.v ⁻¹)	0	9	0	10
ST (%)	2,0	0,5 (74)	1,9	0,4 (77)
MES (mg.l ⁻¹)	20 300	620 (97)	8 500	1 230 (86)
N _{NTK} (mg N.l ⁻¹)	2 670	1 350 (50)	2 330	1 820 (22)
P _t (mg P.l ⁻¹)	1 140	139 (88)	522	215 (59)
NH ₄ ⁺ (mg N-NH ₃ .l ⁻¹)	1 690	1 310 (23)	1 860	1 780 (4)
PO ₄ ³⁻ (mg P.l ⁻¹)	856	132 (85)	390	193 (51)
DCO _t (mg.l ⁻¹)	20 100	4 930 (75)	16 100	8 610 (46)
N-NH ₄ ⁺ /P _t	1	9	4	8

Tableau 44 Caractéristiques de la fraction solide (FS) résultant de traitements en mode cuvée ; lisier de maternité ; Zetag 7557

Paramètres	LABCU01	LABCU02
Polymère (% v.v ⁻¹)	9	10
ST (%)	7,5	9,3
N _{NTK} (% B.S.)	8,0	9,1
P _t (% B.S.)	5,9	4,9
NH ₄ ⁺ (% B.S.)	2,8	3,2
PO ₄ ³⁻ (% B.S.)	3,7	4,0
CO (% B.S.)	33	37
C/N	4	4

Résultats des essais en mode continu

Les tableaux qui suivent montrent les caractéristiques des lisiers bruts et des fractions liquide et solide recueillies lors des essais LABCO01, LABCO02, LABCO03, LABCO04, LABCO05 et LABCO06.

Les concentrations présentées constituent les concentrations moyennes des différents paramètres. Il en est de même pour les ratios N-NH₄⁺/P_t et C/N. Les moyennes correspondent aux moyennes arithmétiques des concentrations des échantillons prélevés aux intervalles présentés dans la méthodologie (section 2.2.2.3). Les fonctions MOYENNE et ÉCARTYPE du logiciel Excel ont été utilisées. Les chiffres entre parenthèses correspondent aux pourcentages d'enlèvement moyens des différents paramètres calculés selon l'équation 12 (annexe B).

Tableau 45 Concentrations en solides, en nutriments et en DCO_t des lisiers bruts de maternité, de pouponnière et d'engraissement

Paramètres	Lisier de maternité		Lisier de pouponnière		Lisier d'engraissement	
	Polymère Zetag 7557		Polymère Zetag 7557		Polymère LPM 9511	
	LABCO01	LABCO02	LABCO03	LABCO04	LABCO05	LABCO06
ST (%)	1,8± 0,2	4,4± 0,3	6,5± 0,3	4,8± 0,4	7,6± 0,5	5,7± 0,4
MES (mg·l ⁻¹)	10 100	42 200± 1 440	45 500± 9 650	31 700± 0	56 500± 295	36 400± 5 790
N _{NTK} (mg N·l ⁻¹)	2 330± 2	4 340	4 320± 387	4 310± 40	7 360± 283	6 340± 94
NH ₄ ⁺ (mg N-NH ₃ ·l ⁻¹)	1 860± 0	3 160	3 640± 273	2 760± 122	3 690± 866	4 970± 417
P _t (mg P·l ⁻¹)	522± 0	1 630± 332	1 400± 36	1 110± 14	1 630± 139	1 240± 41
PO ₄ ³⁻ (mg P·l ⁻¹)	390± 0	1 170	327± 25	221± 19	137± 28	189± 15
DCO _t (mg·l ⁻¹)	16 100	46 000± 7 200	91 500± 8 460	62 100± 3 540	92 700± 177	77 600± 4 270
N-NH ₄ ⁺ /P _t	4± 0		3± 0	2± 0	2± 1	4

Tableau 46 Concentrations en solides, en nutriments et en DCO_t des fractions liquides générées à partir des lisiers de maternité, de pouponnière et d'engraissement

Paramètres	Lisier de maternité		Lisier de pouponnière		Lisier d'engraissement	
	Polymère Zetag 7557		Polymère Zetag 7557		Polymère LPM 9511	
	LABCO01	LABCO02	LABCO03	LABCO04	LABCO05	LABCO06
ST	0,6± 0,1	0,9± 0,1	1,4± 0,1	1,2± 0,0	1,8± 0,2	1,9± 0,2
(%)	(67)	(81)	(78)	(76)	(76)	(67)
MES	1 240± 178	1 590± 885	2 070± 323	1 320± 688	3 570± 1 160	3 860± 1 090
(mg·l ⁻¹)	(88)	(96)	(95)	(96)	(94)	(89)
N _{NTK}	1 780± 147	2 390± 378	3 180± 28	2 610± 187	4 790± 223	4 480± 148
(mg N·l ⁻¹)	(24)	(45)	(26)	(39)	(35)	(29)
NH ₄ ⁺	1 710± 64	2 420± 350	3 170± 63	2 420± 25	4 810± 175	4 140± 103
(mg N-NH ₃ ·l ⁻¹)	(8)	(24)	(13)	(12)	(-31)	(17)
P _t	211± 10	251± 50	317± 16	217± 8	227± 21	213± 16
(mg P·l ⁻¹)	(60)	(85)	(77)	(80)	(86)	(83)
PO ₄ ³⁻	176± 11	229± 42	294± 16	203± 12	190± 6	166± 4
(mg P·l ⁻¹)	(55)	(81)	(10)	(8)	(-38)	(12)
DCO _t	8 130± 476	11 800± 2 584	28 900± 354	21 900± 1 730	30 000± 2 370	33 300± 1 950
(mg·l ⁻¹)	(49)	(74)	(68)	(65)	(68)	(57)
N-NH ₄ ⁺ /P _t	8± 1	10± 1	10± 0	11± 0	22± 3	19± 2

Tableau 47 Concentrations en solides, en nutriments et en DCO_t des fractions solides générées à partir des lisiers de maternité, de pouponnière et d'engraissement

Paramètres	Lisier de maternité		Lisier de pouponnière		Lisier d'engraissement	
	Polymère Zetag 7557		Polymère Zetag 7557		Polymère LPM 9511	
	LABCO01	LABCO02	LABCO03	LABCO04	LABCO05	LABCO06
ST (%)	9,3± 1,3	10,3± 2,2	13,0± 3,2	9,3± 1,5	11,1± 1,2	10,3± 0,9
N _{NTK} ^a (% B.S.)	8,3± 1,7	6,6± 1,3	6,0± 0,7	7,4± 0,9	8,5± 0,8	8,2± 0,4
NH ₄ ⁺ (% B.S.)	2,7± 0,5	2,5± 0,4	2,5± 0,5	2,8± 0,4	4,0± 0,5	4,0± 0,3
P _t (% B.S.)	3,8± 1,1	3,6± 0,6	2,4± 0,4	2,3± 0,2	2,5± 0,3	2,4± 0,1
PO ₄ ³⁻ (% B.S.)	3,0± 1,1	2,9± 0,3	0,8± 0,2	0,8± 0,1	0,6± 0,1	0,6± 0,0
CO (% B.S.)	38± 1	37± 0	40± 1	40± 1	40± 1	41± 0
C/N	5± 1	6± 1	7± 1	5± 1	5± 1	5± 0

^a La consommation moyenne de polymère pour les essais LABCO vaut 0,49 % B.S. (annexe E, tableau 67). Puisqu'une molécule d'acrylamide (C₃H₅NO) contient environ 20 % d'azote, l'addition du polymère génère 0,1 % B.S. de N_{NTK} (0,2*0,49 % B.S.). Considérant que la majorité du polymère se retrouve dans la fraction solide, la majoration de la concentration en N_{NTK} de la fraction solide causée par le polymère vaut 1 à 2 % (exemple pour LABCO05 : 0,1/8,5 = 0,012).

Toujours par rapport aux résultats des essais LABCO, les coefficients de variance ont été calculés pour les concentrations et ratios des lisiers bruts de maternité, de pouponnière et d'engraissement ainsi que pour les fractions liquide et solide générées. La formule utilisée est la suivante :

Équation 13 Coefficients de variance

$$C_v = \frac{s}{\bar{x}}$$

Où CV = Coefficient de variation
s = Écart type
 \bar{x} = Moyenne arithmétique

Ces coefficients de variation doivent être interprétés comme la variabilité des concentrations en fonction de la durée des essais en mode continu. Ils ne sont pas des indices de la représentativité de l'échantillonnage et de la mesure de la concentration puisqu'un seul échantillon et une seule mesure sont disponibles pour chaque temps.

Tableau 48 Coefficients de variation des concentrations pour les lisiers des essais en mode continu à l'échelle du laboratoire

Paramètres	Lisier de maternité		Lisier de pouponnière		Lisier d'engraissement	
	Polymère Zetag 7557		Polymère Zetag 7557		Polymère LPM 9511	
	LABCO01	LABCO02	LABCO03	LABCO04	LABCO05	LABCO06
ST	<i>0,12^a</i>	0,07	0,04	0,09	0,06	0,07
MES	-	0,03	<i>0,21</i>	0,00	0,01	<i>0,16</i>
N _{NTK}	0,00	-	0,09	0,01	0,04	0,01
P _t	0,00	<i>0,20</i>	0,03	0,01	0,09	0,03
NH ₄ ⁺	0,00	-	0,07	0,04	<i>0,24</i>	0,08
PO ₄ ³⁻	0,00	-	0,08	0,08	<i>0,21</i>	0,08
DCO _t	-	<i>0,16</i>	0,09	0,06	0,00	0,05

^a Les coefficients de variation en gras et en italique sont supérieurs à 0,10.

Tableau 49 Coefficients de variation des concentrations des fractions liquides générées à partir des lisiers des essais en mode continu à l'échelle du laboratoire

Paramètres	Lisier de maternité		Lisier de pouponnière		Lisier d'engraissement	
	Polymère Zetag 7557		Polymère Zetag 7557		Polymère LPM 9511	
	LABCO01	LABCO02	LABCO03	LABCO04	LABCO05	LABCO06
ST	<i>0,18^a</i>	<i>0,17</i>	0,04	0,02	0,10	0,10
MES	<i>0,14</i>	<i>0,56</i>	<i>0,16</i>	<i>0,52</i>	<i>0,33</i>	<i>0,28</i>
N _{NTK}	0,08	<i>0,16</i>	0,01	0,07	0,05	0,03
P _t	0,05	<i>0,20</i>	0,05	0,04	0,09	0,08
NH ₄ ⁺	0,04	<i>0,14</i>	0,02	0,01	0,04	0,02
PO ₄ ³⁻	0,06	<i>0,18</i>	0,05	0,06	0,03	0,02
DCO _t	0,06	<i>0,22</i>	0,01	0,08	0,08	0,06

^a Les coefficients de variation en gras et en italique sont supérieurs à 0,10.

Tableau 50 Coefficients de variation des concentrations des fractions solides générées à partir des lisiers des essais en mode continu à l'échelle du laboratoire

Paramètres	Lisier de maternité		Lisier de pouponnière		Lisier d'engraissement	
	Polymère Zetag 7557		Polymère Zetag 7557		Polymère LPM 9511	
	LABCO01	LABCO02	LABCO03	LABCO04	LABCO05	LABCO06
ST	<i>0,14^a</i>	<i>0,21</i>	<i>0,25</i>	<i>0,16</i>	<i>0,11</i>	0,09
N _{NTK}	<i>0,21</i>	<i>0,20</i>	<i>0,12</i>	<i>0,12</i>	0,10	0,05
P _t	<i>0,29</i>	<i>0,17</i>	<i>0,18</i>	0,10	<i>0,12</i>	0,03
NH ₄ ⁺	<i>0,21</i>	<i>0,17</i>	<i>0,21</i>	<i>0,16</i>	<i>0,12</i>	0,08
PO ₄ ³⁻	<i>0,36</i>	<i>0,11</i>	<i>0,25</i>	<i>0,14</i>	<i>0,16</i>	0,07
CO	0,02	0,01	0,03	0,04	0,02	0,01

^{a.} Les coefficients de variation en gras et en italique sont supérieurs à 0,10.



ANNEXE D

Résultats des essais de flottation à l'échelle pilote

Résultats des essais en mode cuvée

Les tableaux qui suivent présentent les caractéristiques des lisiers bruts et des fractions liquides et solides recueillies lors des essais PILCU01, PILCU02, PILCU03, PILCU04 et PILCU05.

Les concentrations en solides, en DCO₅, en nutriments et en CO correspondent à des concentrations moyennes. Les moyennes sont calculées à partir des mesures de concentrations des échantillons qui ont été prélevés en triplicata pour chaque paramètre. Les fonctions MOYENNE et ÉCARTYPE du logiciel Excel ont été utilisées. Les valeurs entre parenthèses situées sous les valeurs des concentrations des fractions liquides correspondent aux pourcentages d'enlèvement moyens. Ces derniers sont calculés de la même façon qu'à l'annexe B (équation 12).

Tableau 51 Concentrations des solides, des nutriments et de la DCO_t pour les lisiers bruts utilisés lors des essais en mode cuvée à l'échelle pilote

Lisier	Maternité	Engraissement			
		Zetag 7557	LPM 9511	Zetag 7654	LPM 9511
Polymère	Zetag 7557	LPM 9511	Zetag 7654	LPM 9511	LPM 9511
TRH (h)	14	11	18	22	24
Paramètres	PILCU01	PILCU02	PILCU03	PILCU04	PILCU05
ST (%)	3,9± 1,9	3,4± 0,0	6,9± 1,0	3,9± 0,1	1,1± 0,0
MES (mg·l ⁻¹)	20 800± 11 100	12 700± 2 740	15 400± 3 270	14 800± 1 930	6 810± 2 770
N _{NTK} (mg N·l ⁻¹)	5 730± 1 200	6 280± 103	10 100± 252	6 060± 347	1 200± 23
NH ₄ ⁺ (mg N-NH ₃ ·l ⁻¹)	1 980± 554	2 150± 327	1 250± 296	2 120± 355	1 230± 49
P _t (mg P·l ⁻¹)	1 710± 902	1 160± 12	1 560± 29	1 090± 55	275± 9
PO ₄ ³⁻ (mg P·l ⁻¹)	130± 39	110± 16	46± 11	102± 18	155± 3
DCO _t (mg·l ⁻¹)	30 900± 7 150	44 000± 328	91 800± 10 600	44 900± 2 470	22 500± 951
N-NH ₄ ⁺ /P _t	1	2	1	2	4

Tableau 52 Concentrations en solides, en nutriments et en DCO_t des fractions liquides générées lors des essais en mode cuvée à l'échelle pilote

Lisier Polymère TRH (h) Paramètres	Maternité	Engraissement			
	Zetag 7557	LPM 9511	Zetag 7654	LPM 9511	LPM 9511
	14	11	18	22	24
	PILCU01	PILCU02	PILCU03	PILCU04	PILCU05
ST	0,7± 0,0	1,3± 0,0	3,8± 0,3	1,7± 0,0	0,7± 0,0
(%)	(82)	(60)	(45)	(57)	(38)
MES	2 000± 393	1 250± 202	13 600± 872	3 360± 243	1 090± 83
(mg·l ⁻¹)	(90)	(90)	(12)	(77)	(84)
N _{NTK}	2 320± 759	4 040± 140	6 660± 437	4 950± 125	1 510± 44
(mg N·l ⁻¹)	(59)	(36)	(34)	(18)	(25)
NH ₄ ⁺	1 650± 191	3 720± 168	2 400± 112	3 170± 78	1 500± 21
(mg N-NH ₃ ·l ⁻¹)	(17)	(-73)	(-92)	(-49)	(-22)
P _t	182± 99	253± 9	742± 48	341± 12	204± 11
(mg P·l ⁻¹)	(89)	(78)	(53)	(69)	(26)
PO ₄ ³⁻	130± 2	205± 2	114± 5	149± 6	214± 4
(mg P·l ⁻¹)	(0)	(-87)	(-148)	(-47)	(-38)
DCO _t	6 630± 227	21 500± 2 560	60 900± 2 610	30 000± 2 010	13 500± 1 360
(mg·l ⁻¹)	(79)	(51)	(34)	(33)	(40)
N-NH ₄ ⁺ /P _t	9	15	3	9	7

Tableau 53 Concentrations en solides, en nutriments et en DCO_t pour les fractions solides générées au cours des essais en mode cuvée à l'échelle pilote

Lisier Polymère TRH (h) Paramètres	Maternité	Engraissement			
	Zetag 7557	LPM 9511	Zetag 7654	LPM 9511	LPM 9511
	14	11	18	22	24
	PILCU01	PILCU02	PILCU03	PILCU04	PILCU05
ST (%)	13,9± 0,4	9,8± 0,3	11,1± 0,3	5,1± 0,1	8,8± 0,3
N _{NTK} (% B.S.)	4,6± 0,1	9,8± 0,1	9,4± 0,2	-	-
NH ₄ ⁺ (% B.S.)	1,5± 0,1	9,4± 0,3	7,8± 1,2	13,0± 0,5	-
P _t (% B.S.)	4,1± 0,2	3,5± 0,0	2,4± 0,1	3,1± 0,5	1,9± 0,2
PO ₄ ³⁻ (% B.S.)	-	1,1± 0,1	0,8± 0,1	1,7± 0,0	1,8± 0,0
CO (% B.S.)	42	49± 0	49	-	49± 0
C/N	9	5	5	-	-

En complément des informations des tableaux précédents, les coefficients de variation associés aux concentrations de chaque paramètre ont été évalués pour les essais PILCU01 à PILCU05. Les calculs des coefficients de variation sont similaires à ceux de l'annexe C (équation 13). Ces coefficients de variation fournissent des informations sur la représentativité des échantillons (prélèvement, conservation et analyse) puisque, pour chaque paramètre à mesurer, un triplicata d'échantillons a été prélevé.

Tableau 54 Coefficients de variation des concentrations des lisiers bruts des essais en mode cuvée à l'échelle pilote

Lisier	Maternité	Engraissement			
		LPM 9511	Zetag 7654	LPM 9511	LPM 9511
Polymère	Zetag 7557	LPM 9511	Zetag 7654	LPM 9511	LPM 9511
TRH (h)	14	11	18	22	24
Paramètres	PILCU01	PILCU02	PILCU03	PILCU04	PILCU05
ST	<i>0,50^a</i>	0,01	0,14	0,02	0,01
MES	<i>0,53</i>	<i>0,22</i>	<i>0,21</i>	<i>0,13</i>	<i>0,41</i>
N _{NTK}	<i>0,21</i>	0,02	0,02	0,06	0,01
NH ₄ ⁺	<i>0,28</i>	<i>0,15</i>	<i>0,24</i>	<i>0,17</i>	0,04
P _t	<i>0,53</i>	0,01	0,02	0,05	0,03
PO ₄ ³⁻	<i>0,30</i>	<i>0,14</i>	<i>0,23</i>	<i>0,18</i>	0,02
DCO _t	<i>0,23</i>	0,01	0,12	0,06	0,04

^{a.} Les coefficients de variation en gras et en italique sont supérieurs à 0,10.

Tableau 55 Coefficients de variation des concentrations des fractions liquides générées à partir des lisiers des essais en mode cuvée à l'échelle pilote

Lisier	Maternité	Engraissement			
		LPM 9511	Zetag 7654	LPM 9511	LPM 9511
Polymère	Zetag 7557	LPM 9511	Zetag 7654	LPM 9511	LPM 9511
TRH (h)	14	11	18	22	24
Paramètres	PILCU01	PILCU02	PILCU03	PILCU04	PILCU05
ST	0,04	0,01	0,08	0,00	0,01
MES	<i>0,20^a</i>	<i>0,16</i>	0,06	0,07	0,08
N _{NTK}	<i>0,33</i>	0,03	0,07	0,03	0,03
NH ₄ ⁺	<i>0,12</i>	0,05	0,05	0,02	0,01
P _t	<i>0,55</i>	0,03	0,06	0,04	0,05
PO ₄ ³⁻	0,02	0,01	0,04	0,04	0,02
DCO _t	0,03	<i>0,12</i>	0,04	0,07	0,10

^{a.} Les coefficients de variation en gras et en italique sont supérieurs à 0,10.

Tableau 56 Coefficients de variation concentrations des fractions solides générées à partir des lisiers des essais en mode cuvée à l'échelle pilote

Lisier	Maternité	Engraissement			
		LPM 9511	Zetag 7654	LPM 9511	LPM 9511
Polymère	Zetag 7557	LPM 9511	Zetag 7654	LPM 9511	LPM 9511
TRH (h)	14	11	18	22	24
Paramètres	PILCU01	PILCU02	PILCU03	PILCU04	PILCU05
ST	0,03	0,03	0,03	0,02	0,03
N _{NTK}	0,02	0,01	0,02	0,09	-
NH ₄ ⁺	0,04	0,03	<i>0,16^a</i>	0,04	-
P _t	0,04	0,01	0,02	<i>0,16</i>	0,10
PO ₄ ³⁻	-	0,08	<i>0,17</i>	0,03	0,03
CO	-	0,00	-	-	0,00

^{a.} Les coefficients de variation en gras et en italique sont supérieurs à 0,10.

Résultats des essais en mode continu

Les tableaux qui suivent montrent les concentrations en solides, en nutriments, en DCO_t de même que le ratio $\text{N-NH}_4^+/\text{P}_t$ des lisiers bruts utilisés pour l'essai PILCO01. Tout comme pour les essais en mode cuvée, les concentrations moyennes proviennent du triplicata des échantillons prélevés pour chaque paramètre. Les fonctions MOYENNE et ÉCARTYPE du logiciel Excel ont servies pour les calculs.

Tableau 57 Concentrations en solides, en nutriments et en DCO_t pour les lisiers bruts utilisés pour l'essai en mode continu à l'échelle pilote ; lisier d'engraisement ; polymère LPM 9511 ; TRH = 22 h

Paramètres	Temps (h)	
	0	24
ST (% B.S.)	3,5± 0,0	3,4± 0,0
MES (mg·l ⁻¹)	15 500± 2 190	12 700± 2 740
N _{NTK} (mg N·l ⁻¹)	6 100± 214	6 280± 103
NH ₄ ⁺ (mg N-NH ₃ ·l ⁻¹)	2 800± 33	2 150± 327
P _t (mg P·l ⁻¹)	1 140± 54	1 160± 12
PO ₄ ³⁻ (mg P·l ⁻¹)	142± 1	110± 16
DCO _t (mg·l ⁻¹)	45 100± 4 830	43 900± 328
N-NH ₄ ⁺ /P _t	2	2

Afin de compléter les informations relatives aux concentrations de divers paramètres pour l'essai en mode continu à l'échelle pilote, des coefficients de variation ont été calculés selon l'équation 13 (annexe C). Les tableaux suivants présentent ces résultats.

Tableau 58 Coefficients de variation des concentrations des lisiers bruts des essais en mode continu à l'échelle pilote

Paramètres	Temps (h)	
	0	24
ST	0,01	0,01
MES	<i>0,14^a</i>	<i>0,22</i>
N _{NTK}	0,04	0,02
NH ₄ ⁺	0,01	<i>0,15</i>
P _t	0,05	0,01
PO ₄ ³⁻	0,00	<i>0,14</i>
DCO _t	<i>0,11</i>	0,01

^{a.} Les coefficients de variation en gras et en italique sont supérieurs à 0,10.

Tableau 59 Coefficients de variation des concentrations des fractions liquides générées à partir des lisiers des essais en mode continu à l'échelle pilote

Paramètres	Temps (h)		
	0	24	36
ST	0,00	0,01	0,00
MES	0,07	<i>0,17^a</i>	0,02
N _{NTK}	0,03	0,04	0,03
NH ₄ ⁺	0,02	0,06	0,03
P _t	0,04	0,04	0,04
PO ₄ ³⁻	0,04	0,03	0,01
DCO _t	0,07	0,08	0,04

^{a.} Les coefficients de variation en gras et en italique sont supérieurs à 0,10.

Tableau 60 Coefficients de variation des concentrations des fractions solides générées à partir des lisiers des essais en mode continu à l'échelle pilote

Paramètres	Temps (h)		
	0	24	36
ST	0,02	0,03	0,03
N _{NTK}	-	-	-
NH ₄ ⁺	0,04	0,02	0,01
P _t	<i>0,16^a</i>	0,01	0,03
PO ₄ ³⁻	0,03	0,03	0,05
CO	-	-	-

^a Les coefficients de variation en gras et en italique sont supérieurs à 0,10.

De plus, le tableau ci-contre présente les détails des bilans de masse réalisés sur les solides, le P_t et le N_{NTK} lors de l'essai PILCO01. Noter que ces bilans de masse incluent également les données des essais en mode cuvée PILCU04 et PILCU02 qui constituent respectivement le début et la fin de l'essai PILCO01.

Tableau 61 Sommaire des bilans de masses sur les solides et le P_t pour l'essai en mode de fonctionnement continu à l'échelle pilote ; lisier d'engraissement ; polymère LPM 9511 ; TRH = 22 h

Paramètres	Entrées			Sorties			Err. (%)
	LB	P	FS _{déc.}	FL	FS _{déc.}	FS _{flot.}	
Bilan de masse							
V_t (l)	695	132	18	680	48	117	-
ST (g.l ⁻¹)	34	1	35	14	35	62	-
M_t (kg B.S.)	23,6	0,1	0,6	9,5	1,7	7,2	-
M_t (kg B.S.)		24,4			18,4		-24
Bilan de phosphore							
P_t (mg P.l ⁻¹)	1 150	-	-	283	-	-	-
P_t (% B.S.)	-	-	-	-	3,1		-
$M_{t P_t}$ (kg P)	0,8	-	-	0,2	0,3		-
$M_{t P_t}$ (kg P)		0,8			0,5		-41

Ensuite, les détails concernant les paramètres de conception et d'opération pour les flottateurs à l'échelle du laboratoire et à l'échelle pilote sont présentés ci-après.

Tableau 62 Détails des paramètres d'opération des essais en mode de fonctionnement continu pour le flottateur de laboratoire et celui à l'échelle pilote

Lisier Polymère	Maternité		Pouponnière		Engraissement		
	Zetag 7557		Zetag 7557		LPM 9511		
Paramètres	LABCO01	LABCO02	LABCO03	LABCO04	LABCO05	LABCO06	PILCO01
ST (%)	1,8	4,4	6,5	4,8	7,6	5,7	3,4
TRH (h)	4,6	4,6	6,4	6,4	6,4	6,4	21
Débit _v LB (x10 ⁻³ m ³ ·h ⁻¹)	5,0	5,0	3,6	3,6	3,6	3,6	15
Surface (x10 ⁻³ m ²)	45,0	45,0	45,0	45,0	45,0	45,0	300
Charge hydraulique (m ³ ·h ⁻¹ ·m ⁻²)	0,11	0,11	0,08	0,08	0,08	0,08	0,05
MES (kg·m ⁻³)	10	42	46	32	56	36	14
Débit _m MES (kg·h ⁻¹)	0,05	0,21	0,16	0,11	0,20	0,13	0,21
Charge de solides (kg·h ⁻¹ ·m ⁻²)	1,1	4,7	3,6	2,5	4,5	2,9	0,7
Ajout de polymère (x10 ³ mg·kg ⁻¹)	19,8	4,74	4,39	6,32	3,54	5,49	14,9
Ajout de polymère ^a (x10 ³ mg·kg ⁻¹)	11,4	4,50	3,06	4,13	2,65	3,50	6,13

^a. Masse de polymère ajoutée en fonction de la masse de solides totaux de l'affluent.

Résultats du suivi de l'efficacité du filtre de tourbe

Les tableaux ci-après présentent les concentrations moyennes en solides, en nutriments, en DCO_t et en coliformes fécaux de même que les ratios $\text{N-NH}_4^+/\text{P}_t$ des fractions liquides et des fractions liquides filtrées générées au cours des essais FIL01, FIL02, FIL03 et FIL04. Tout comme pour les essais de flottation en mode cuvée et en mode continu, les concentrations moyennes proviennent du triplicata des échantillons prélevés pour chaque paramètre. Les fonctions MOYENNE et ÉCARTYPE du logiciel Excel ont servies pour les calculs.

Tableau 63 Concentrations en solides, en nutriments, en DCO_t et en coliformes fécaux des fractions liquides utilisées pour le suivi du filtre de tourbe

Temps de fonctionnement (j)	4,8	37,5	44,5	45,4	91,1	91,4	92,2	92,4
TRH (j)	0,35	0,40	2,1	2,1	0,71	0,71	5,9	5,9
Paramètres	FIL01	FIL02	FIL03		FIL04			
ST (%)	0,7± 0,0	1,8± 0,1	0,8± 0,0	0,7± 0,0	1,3± 0,0	-	1,3± 0,0	1,4± 0,0
MES (mg·l ⁻¹)	2 000± 393	6 920± 293	1 960± 90	1 090± 83	2 040± 355	-	2 010± 47	2 290± 264
N _{NTK} (mg N·l ⁻¹)	2 320± 759	3 380± 16	1 770± 39	1 510± 44	3 920± 138	-	3 920± 98	4 100± 47
NH ₄ ⁺ (mg N-NH ₃ ·l ⁻¹)	1 650± 191	1 540± 50	1 580± 44	1 500± 21	3 540± 202	-	3 670± 103	3 710± 131
P _t (mg P·l ⁻¹)	182± 99	232± 3	208± 6	204± 11	258± 11	-	250± 9	250± 6
PO ₄ ³⁻ (mg P·l ⁻¹)	130± 2	82± 2	173± 1	214± 4	163± 5	-	179± 3	208± 1
DCO _t (mg·L ⁻¹)	6 630± 227	33 800± 908	13 000± 1047	13 500± 1358	18 600± 1 400	-	21 700± 867	20 700± 3 030
CF (UFC·100 ml)	-	-	-	-	-	2E+06	2E+06	1E+06
N-NH ₄ ⁺ /P _t	9	7	8	7	14	-	15	15

Tableau 64 Concentrations en solides, en nutriments, en DCO_t et en coliformes fécaux des fractions liquides filtrées générées lors du suivi du filtre de tourbe

Temps de fonctionnement (j)	4,8	37,5	44,5	45,4	91,1	91,4	92,2	92,4
TRH (j)	0,35	0,40	2,1	2,1	0,71	0,71	5,9	5,9
Paramètres	FIL01	FIL02	FIL03			FIL04		
ST	0,6± 0,0	0,9± 0,1	1,0± 0,0	1,4± 0,5	0,8± 0,0	-	0,9± 0,0	1,0± 0,0
(%)	(9)	(53)	(-30)	(-97)	(39)	-	(30)	(32)
MES	615± 40	705± 32	982± 38	1 092± 24	232± 41	-	337± 56	231± 23
(mg·l ⁻¹)	(69)	(90)	(50)	(0)	(89)	-	(83)	(90)
N _{NITK}	2 320± 444	1 440± 74	2 070± 72	2 180± 129	2 380± 17	-	2 510± 76	2 600± 127
(mg N·l ⁻¹)	(0)	(57)	(-17)	(-44)	(39)	-	(36)	(37)
NH ₄ ⁺	18 206± 86	1 260± 26	2 050± 23	2 180± 62	2 080± 755	-	2 550± 366	2 790± 239
(mg N-NH ₃ ·l ⁻¹)	(-10)	(18)	(-29)	(-46)	(41)	-	(31)	(25)
P _t	152± 23	145± 8	132± 5	136± 8	133± 6	-	131± 4	134± 8
(mg P·l ⁻¹)	(16)	(37)	(36)	(34)	(48)	-	(47)	(47)
PO ₄ ³⁻	146± 16	144± 2	117± 1	118± 2	128± 2	-	120± 1	118± 2
(mg P·l ⁻¹)	(-12)	(-75)	(33)	(45)	(21)	-	(33)	(43)
DCO _t	6 340± 96	7 240± 551	16 700± 273	15 400± 1 950	7 100± 1 700	-	8 730± 365	9 820± 2 310
(mg·l ⁻¹)	(4)	(79)	(-29)	(-14)	(62)	-	(60)	(52)
CF (UFC·100 ml)	-	-	-	-	-	3E+05	3E+05	2E+05
						(84)	(85)	(79)
N-NH ₄ ⁺ /P _t	12	9	16	16	16	-	19	21

En complément aux tableaux des concentrations des fractions liquides et liquides filtrées, les tableaux qui suivent présentent les coefficients de variation calculés sur ces concentrations selon l'équation 13 (annexe C). Ces coefficients de variation témoignent de la représentativité des échantillons (prélèvement, conservation, analyse) prélevés en triplicata pour chaque paramètre à mesurer.

Tableau 65 Coefficients de variation des concentrations des fractions liquides utilisées lors du suivi du filtre de tourbe

Temps de fonctionnement (j)	4,8	37,5	44,5	45,4	91,1	91,4	92,2	92,4
TRH (j)	0,35	0,40	2,1	2,1	0,71	0,71	5,9	5,9
Paramètres	FIL01	FIL02	FIL03		FIL04			
ST	0,04	0,05	0,02	0,01	0,01	-	0,00	0,02
MES	0,20^a	0,04	0,05	0,08	0,17	-	0,02	0,12
N _{NTK}	0,33	0,00	0,02	0,03	0,04	-	0,03	0,01
NH ₄ ⁺	0,12	0,03	0,03	0,01	0,06	-	0,03	0,04
P _t	0,55	0,01	0,03	0,05	0,04	-	0,04	0,02
PO ₄ ³⁻	0,02	0,03	0,01	0,02	0,03	-	0,01	0,00
DCO _t	0,03	0,03	0,08	0,10	0,08	-	0,04	0,15
CF	-	-	-	-	-	-	-	-

^a Les coefficients de variation en gras et en italique sont supérieurs à 0,10.

Tableau 66 Coefficients de variation des concentrations des fractions liquides filtrées générées lors du suivi du filtre de tourbe

Temps de fonctionnement (j)	4,8	37,5	44,5	45,4	91,1	91,4	92,2	92,4
TRH (j)	0,35	0,40	2,1	2,1	0,71	0,71	5,9	5,9
Paramètres	FIL01	FIL02	FIL03		FIL04			
ST	0,01	<i>0,13</i>	0,01	<i>0,36</i>	0,01	-	0,05	0,04
MES	0,06	0,05	0,04	0,02	<i>0,17</i>	-	<i>0,17</i>	0,10
N _{NTK}	<i>0,19^a</i>	0,05	0,03	0,06	0,01	-	0,03	0,05
NH ₄ ⁺	0,05	0,02	0,01	0,03	<i>0,36</i>	-	<i>0,14</i>	0,09
P _t	<i>0,15</i>	0,05	0,04	0,06	0,05	-	0,03	0,06
PO ₄ ³⁻	<i>0,11</i>	0,02	0,01	0,02	0,01	-	0,01	0,02
DCO _t	0,02	0,08	0,02	<i>0,13</i>	<i>0,24</i>	-	0,04	<i>0,24</i>
CF	-	-	-	-	-	-	-	-

a. Les coefficients de variation en gras et en italique sont supérieurs à 0,10.

ANNEXE E

Résultats de l'analyse économique

Évaluation de la consommation et des coûts des polymères

Le tableau suivant présente les variables qui ont été nécessaires pour parvenir aux calculs de la consommation de polymère par mètre cube de lisier brut et des coûts d'utilisation de ces derniers et ce, pour les essais en mode continu à l'échelle du laboratoire et à l'échelle pilote.

Tableau 67 Consommation (Cons._p) et coûts (Coûts_p) des polymères pour les essais en mode continu à l'échelle du laboratoire et à l'échelle pilote

Essais	Type _{LB}	M _{LB} (kg _{sec})	V _{LB} (m ³)	Type _p	M _p (kg _{sec})	Cons. _p (kg·kg ⁻¹)	Cons. _p (kg·m ⁻³)	Prix _p (\$·kg ⁻¹)	Coûts _p (\$·m ⁻³)
LABCO01	M	2,2	0,13	Zetag 7557	0,025	0,011	0,19	6,00	1,15
LABCO02	M	5,6	0,13	Zetag 7557	0,025	0,0045	0,19	6,00	1,15
LABCO03	P	9,4	0,14	Zetag 7557	0,029	0,0031	0,21	6,00	1,24
LABCO04	P	4,4	0,09	Zetag 7557	0,018	0,0041	0,20	6,00	1,20
LABCO05	E	6,8	0,09	LPM 9511	0,018	0,0026	0,20	5,25	1,05
LABCO06	E	1,4	0,02	LPM 9511	0,005	0,0036	0,25	5,25	1,31
PILCO01	E	14,7	0,43	LPM 9511	0,083	0,0056	0,19	5,25	1,01

Calculs des coûts d'immobilisation

À l'aide de la fonction VPM du logiciel Excel, qui évalue le montant total de chaque remboursement périodique d'un investissement à remboursements et taux d'intérêt constants, il a été possible de fixer la valeur des remboursements pour un taux d'intérêt de 7 % composé annuellement et un nombre de versements égale à 5 (un paiement par année). Ainsi, le remboursement annuel du capital, incluant le coût du capital, sera de 20 730,71 \$. Quant aux calculs des intérêts à payer pour chaque période, il a été réalisé avec la fonction INTER du logiciel Excel qui donne le montant des intérêts d'un investissement pour une période donnée, fondé sur des paiements périodiques et constants, et un taux d'intérêt stable. Les variables utilisées sont un taux d'intérêt de 7 % composé annuellement payé annuellement pour un nombre total de remboursements égale à 5. Le tableau suivant présente la ventilation de ces remboursements.

Tableau 68 Montants des intérêts payés pour un emprunt de 85 000\$

Période	Capital en début de période	Intérêts payés	Capital remboursé
0	-	-	-
1	85 000,00 \$	5 950,00 \$	14 780,71 \$
2	70 219,29 \$	4 915,35 \$	15 815,36 \$
3	54 403,93 \$	3 808,28 \$	16 922,43 \$
4	37 481,50 \$	2 623,70 \$	18 107,00 \$
5	19 374,49 \$	1 356,21 \$	19 374,49 \$
6	0,00 \$	-	-
Total	-	18 653,55 \$	85 000,00 \$

Prenant en compte que les coûts d'immobilisation et d'installation sont amortis sur la période de vie utile (15 ans), les annuités s'élèvent à 5 666,67 \$. Quant aux intérêts payés annuellement, ils sont présentés au tableau ci-dessus.

Calculs des coûts d'opération et des coûts totaux

L'exemple de calcul qui suit a été réalisé avec le lisier d'engraissement pour un volume annuel de lisier de $5\,000\text{ m}^3\cdot\text{an}^{-1}$. Les calculs se présentent sous la forme d'un flux monétaire des coûts annuels et des coûts par mètre cube de lisier. Voici les exemples de calcul au sujet des coûts d'opération (coûts d'entretien, des produits, d'énergie et de main d'œuvre).

Coûts d'entretien :

$$C_{\text{entretien}} = \frac{0,03}{\text{an}} * 85000\$ = 2550 \frac{\$}{\text{an}}$$

Coûts des produits :

$$C_{\text{produits}} = 5000 \frac{\text{m}^3}{\text{an}} * 1,16 \frac{\$}{\text{m}^3} = 5800 \frac{\$}{\text{an}}$$

Coûts d'énergie :

$$C_{\text{énergie}} = 104 \frac{\text{kWh}}{\text{j}} * 365 \frac{\text{j}}{\text{an}} * 0,0597 \frac{\$}{\text{kWh}} = 2266 \frac{\$}{\text{an}}$$

Coûts main d'œuvre :

$$C_{\text{main d'oeuvre}} = 0,5 \frac{\text{h}}{\text{j}} * 350 \frac{\text{j}}{\text{an}} * 18 \frac{\$}{\text{h}} = 3150 \frac{\$}{\text{an}}$$

Ensuite, les coûts totaux ont pu être évalués et ils sont détaillés dans le tableau qui suit. Prendre note que la colonne «Somme» constitue la somme des coûts annuels pour chaque item. Par la suite, les coûts par mètre cube de lisier sont calculés de la façon suivante :

$$C_{\text{imm}} = 104 * 1000 \frac{\$}{\text{an}} \div (5000 \frac{\text{m}^3}{\text{an}} * 15 \text{ans}) = 1,38 \frac{\$}{\text{m}^3}$$

Tableau 69 Flux monétaire des coûts annuels (1 000 \$·an⁻¹)

Années	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	Sommation
Immobilisation																	
Capital		5,67	5,67	5,67	5,67	5,67	5,67	5,67	5,67	5,67	5,67	5,67	5,67	5,67	5,67	5,67	85,0
Intérêts		5,95	4,92	3,81	2,62	1,36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18,7
Sous-total		11,6	10,6	9,48	8,29	7,02	5,67	5,67	5,67	5,67	5,67	5,67	5,67	5,67	5,67	5,67	104
Opération																	
Entretien		2,55	2,55	2,55	2,55	2,55	2,55	2,55	2,55	2,55	2,55	2,55	2,55	2,55	2,55	2,55	38,3
Produits		5,80	5,80	5,80	5,80	5,80	5,80	5,80	5,80	5,80	5,80	5,80	5,80	5,80	5,80	5,80	87,0
Énergie		2,27	2,27	2,27	2,27	2,27	2,27	2,27	2,27	2,27	2,27	2,27	2,27	2,27	2,27	2,27	34,0
Main d'œuvre		3,15	3,15	3,15	3,15	3,15	3,15	3,15	3,15	3,15	3,15	3,15	3,15	3,15	3,15	3,15	47,3
Sous-total		13,8	13,8	13,8	13,8	13,8	13,8	13,8	13,8	13,8	13,8	13,8	13,8	13,8	13,8	13,8	206
Totaux																	
Total		25,4	24,3	23,2	22,1	20,8	19,4	19,4	19,4	19,4	19,4	19,4	19,4	19,4	19,4	19,4	310
Coûts (\$·m ⁻³) ^a																	
Imm.		2,32	2,12	1,89	1,66	1,40	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,38
Op.		2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75
Totaux		5,08	4,87	4,65	4,41	4,16	3,89	3,89	3,89	3,89	3,89	3,89	3,89	3,89	3,89	3,89	4,14

^a Pour un volume annuel de lisier de 5 000 m³·an⁻¹.

Analyses de sensibilité sur les coûts de traitement du lisier

Les tableaux des résultats des analyses de sensibilité sont présentés ci-après. Les conditions de référence pour la réalisation des analyses sont les suivantes :

- Capital investi : 85 000 \$;
- Volume annuel de lisier à traiter : 5 000 m³·an⁻¹ (environ 2 000 porcs-espaces) ;
- Coûts des polymères : 1,16 \$·kg⁻¹ ;
- Concentration de polymère : 16 % v·v⁻¹ ;
- Entretien : 3 %·an⁻¹ du capital investi ;
- Temps de travail : 0,5 h·j⁻¹.

Tableau 70 Variation des coûts pour le traitement du lisier en fonction du volume annuel de lisier produit et traité

Volume (m ³ ·an ⁻¹)	Coûts		
	Immobilisation (\$·m ⁻³)	Opération (\$·m ⁻³)	Totaux (\$·m ⁻³)
2 500	2,76	4,35	7,11
5 000	1,38	2,75	4,14
10 000	1,04	2,17	3,20
15 000	0,92	1,97	2,89

Tableau 71 Variation des coûts pour le traitement du lisier en fonction du capital investi

Capital investi	Coûts		
	Immobilisation	Opération	Totaux
(\$)	(\$·m ⁻³)	(\$·m ⁻³)	(\$·m ⁻³)
85 000	1,38	2,75	4,14
106 250	1,73	2,88	4,61
127 500	2,07	3,01	5,08

Tableau 72 Variation des coûts pour le traitement du lisier en fonction du temps de main d'œuvre nécessaire

Temps de main d'œuvre	Coûts		
	Immobilisation	Opération	Totaux
(h)	(\$·m ⁻³)	(\$·m ⁻³)	(\$·m ⁻³)
0,5	1,38	2,75	4,14
2,0	1,38	4,64	6,03
3,5	1,38	6,53	7,92

Tableau 73 Variation des coûts pour le traitement du lisier en fonction des coûts d'entretien

Entretien	Coûts		
	Immobilisation	Opération	Totaux
(% du capital)	(\$·m ⁻³)	(\$·m ⁻³)	(\$·m ⁻³)
3	1,38	2,75	4,14
6	1,38	3,26	4,65

Tableau 74 Variation des coûts pour le traitement du lisier en fonction de la concentration de polymère ajoutée

Concentration de polymère (% v·v ⁻¹)	Coûts		
	Immobilisation (\$·m ⁻³)	Opération (\$·m ⁻³)	Totaux (\$·m ⁻³)
16	1,38	2,75	4,14
25 ^a	1,38	3,48	4,87

^a. Le coût moyen de polymère pour une concentration de 25 % v·v⁻¹ s'élève à 1,89 \$·kg⁻¹ (entre 1,75 et 2,00 \$·kg⁻¹).

