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

Séparation du lisier bovin par le procédé de flottation biologique LISOX

par
Mélanie Pinatton
Ingénieur maître en Génie de l'Environnement

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

Jury d'évaluation

Examinateur Externe	Monsieur Léon-Étienne Parent Université Laval
Examinateur Interne	Monsieur Patrick Drogui 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

Septembre 2007

© Droits réservés de Mélanie Pinatton

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier mon directeur de thèse, Jean-François Blais, pour m'avoir confié ce projet, et fourni le soutien financier nécessaire. Merci également à mon codirecteur, Guy Mercier, pour ses conseils scientifiques. Vos recommandations et votre disponibilité ont été d'une aide précieuse.

J'exprime aussi ma gratitude à toute l'équipe de Corporation HET pour leur soutien et leurs idées, et plus particulièrement à Danielle Leblanc, qui m'a accompagnée et épaulée dans mes échantillonnages.

Je remercie bien évidemment les techniciens de laboratoire de l'INRS-ETE toujours présents pour de judicieux conseils, et également Myriam Chartier, une personne ressource essentielle au bon fonctionnement des projets de l'équipe d'assainissement.

Enfin, un gros MERCI à ma famille, à Vincent, et à Nathalie pour leurs encouragements, et pour n'avoir jamais douté.

RÉSUMÉ

Ce projet de recherche visait à évaluer l'efficacité d'une technologie de séparation solide/liquide du lisier de porc basée sur le processus de flottation biologique, pour le traitement du lisier de bovin. Le procédé a été évalué par des séries d'essais de flottation biologique réalisés dans des cônes Imhoff de 1 L de capacité et sur deux types de rejets : le lisier de veau et le lisier de vache-génisse mélangé. L'effet du type et de la concentration de polymère a été étudié sur les différents lisiers, ainsi que l'influence du vieillissement, des solides totaux, du tamisage et de la température sur la qualité de séparation par flottation biologique.

La performance du procédé a été déterminée par les mesures du phosphore total (P_{tot}) et de l'azote ammoniacal ($N\text{-}NH_4^+$) dans la fraction liquide, permettant de déterminer le rapport $N\text{-}NH_4^+/P_{tot}$. Les taux d'enlèvement des matières en suspension (MES) et des solides totaux (ST) ont également été mesurés, ainsi que la siccité de la fraction solide. De plus, deux indices semi-quantitatifs ont été évalués afin de qualifier la qualité de la séparation solide/liquide : l'indice composé de la qualité de la flottation (ICQF) et l'indice composé de la mesure de la flottation (ICMF).

Les essais avec le lisier de veau ont permis d'observer une bonne capacité de flottation pour ce type de lisier bovin, suite à l'addition d'un polymère cationique fort (Zetag 7557 à 13% v v^{-1}). La flottation s'effectue en 18 h environ et ne requiert aucune dilution ni tamisage du lisier. Le procédé de flottation biologique s'avère donc intéressant comme technique de séparation solide/liquide de ce type de rejet. Il faut cependant noter que ce type d'exploitation est peu développé au Québec. Les résultats obtenus pour les lisiers de vache-génisse mélangés sont, quant à eux, fortement variables, selon la provenance du lisier. Ainsi, une bonne qualité de séparation a été obtenue avec un lisier de vache-génisse dont la litière était constituée de paille, suite à un apport d'un polymère cationique très fort (Zetag 7654 à 13% v v^{-1}). En contrepartie, aucune flottation n'a été constatée dans le cas d'un lisier de vache-génisse dont la litière contenait de la sciure de bois. Une mauvaise séparation a aussi été observée pour un autre lisier de vache-génisse constituée également de paille. Suite à ces résultats, un procédé de séparation par tamisage suivi d'une décantation du lisier de vache-génisse a été exploré et a montré des performances plus satisfaisantes (taux de MES inférieur à 0,50 g L^{-1}) après une période de 15 h de décantation.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS ..... **III**

RÉSUMÉ ..... **V**

TABLE DES MATIÈRES ..... **VII**

LISTE DES TABLEAUX ..... **XIII**

LISTE DES FIGURES ..... **XV**

LISTE DES ÉQUATIONS ..... **XVII**

LISTE DES ABRÉVIATIONS ..... **XIX**

LISTE DES ABRÉVIATIONS DES TRAITEMENTS ..... **XXI**

INTRODUCTION **1**

1. REVUE DE LITTÉRATURE **5**

1.1 DÉFINITION ET TYPES DE LISIER 5

1.2 COMPOSANTES DU LISIER DE BOVIN 6

1.2.1 Éléments nutritifs *6*

1.2.2 Matières organiques *8*

1.2.3 Microorganismes *8*

1.2.4 Métaux lourds *8*

1.2.5 Médicaments *9*

1.2.6 Inventaire des caractéristiques du lisier de bovin et différences essentielles avec le lisier de porc *9*

1.3 TYPES DE GESTION DES REJETS DE LISIER 14

1.3.1 Gestion sous forme liquide *15*

1.3.2 Gestion sous forme solide-liquide *16*

1.3.3 Gestion sous forme solide *16*

1.4 PROBLÉMATIQUE DE LA GESTION DES REJETS DE LISIER 17

1.4.1 Contamination des eaux *17*

1.4.1.1 Eaux de surface 18

1.4.1.2 Eaux souterraines 19

1.4.2 Pollution de l'air 19

1.4.3 Dégradation des sols agricoles 21

1.5 STRATÉGIES ENVIRONNEMENTALES DE GESTION DU LISIER 21

1.5.1 Mesures préalables à l'implantation d'un traitement du lisier 21

1.5.1.1 Diminution de la charge en éléments fertilisants du lisier 22

1.5.1.2 Diminution du volume de lisier produit 22

1.5.1.3 Atténuation des odeurs 23

1.5.2 Traitement du lisier à implanter 23

1.6 TECHNOLOGIES DE TRAITEMENT EXISTANTES 24

1.6.1 Procédés mécaniques 26

1.6.1.1 Séparation mécanique 26

1.6.1.2 Filtration 26

1.6.2 Procédés biologiques 26

1.6.2.1 Traitement aérobie 26

1.6.2.2 Traitement anaérobie 27

1.6.2.3 Compostage 28

1.6.2.4 Marais filtrants (ou marais épurateur) 28

1.6.3 Procédés chimiques 29

1.6.3.1 Acidification, oxydation et chaulage 29

1.6.4 Procédés thermiques 29

1.6.4.1 Séchage 29

1.6.5 Procédés physico-chimiques 30

1.6.5.1 Oligolyse 30

1.6.5.2 Décantation avec coagulation et/ou floculation 30

1.6.6 Technologies de traitement commercialisables 31

1.6.7 Technologie de traitement à l'étude *34*

1.7 TECHNOLOGIE DE TRAITEMENT DU LISIER PAR FLOTTATION BIOLOGIQUE 34

1.7.1 Flottation biologique *35*

1.7.1.1 Définitions et applicabilité au lisier de bovin 35

1.7.1.2 Théorie de la flottation provoquée 37

1.7.1.3 Mécanismes de génération de bulles de gaz 39

1.7.2 Coagulation-floculation *39*

1.7.2.1 Définitions et mécanismes 40

1.7.2.2 Nature et particularités des polymères synthétiques 40

1.7.2.3 Application au lisier de bovin 42

1.7.3 Paramètres et fonctionnement actuel de la technologie LISOX *43*

1.7.4 Rendements moyens de la technologie LISOX pour le lisier de porc *44*

1.7.5 Avantages de la technologie LISOX *44*

1.8 CRITÈRES D'ÉVALUATION DES TECHNOLOGIES 45

1.8.1 Indice composé de la mesure de la flottation (ICMF) et Indice composé de la qualité de la flottation (ICQF) *47*

1.8.2 Rapport azote ammoniacal/phosphore total et enlèvement du phosphore total de la fraction liquide *49*

1.8.3 Enlèvement des matières en suspension (MES) et des solides totaux (ST) de la fraction liquide *50*

1.8.4 Siccité de la fraction solide *50*

1.8.5 Concentration des formes solubles de l'azote ($N\text{-}NH_4$) et du phosphore ($P\text{-}PO_4$) de la fraction liquide *51*

1.8.6 Concentration en azote total Kjeldahl (N-NTK) de la fraction liquide *51*

1.8.7 Concentration des formes organiques de l'azote (N-org) et du phosphore (P-org) de la fraction liquide *51*

1.9 VALORISATION DES SOUS-PRODUITS 52

1.9.1 Devenir des différentes fractions après traitement *52*

1.9.2 Spécificité des normes d'épandage pour les lisiers traités à l'aide de polymères *53*

1.10 BUT DE LA RECHERCHE 57

1.11 OBJECTIFS SPÉCIFIQUES DE RECHERCHE 57

1.12 DÉMARCHE EXPÉRIMENTALE 58

1.12.1 Pré-essais *58*

1.12.2 Essais d'optimisation *58*

2. DÉMARCHE MÉTHODOLOGIQUE 61

2.1 ÉCHANTILLONNAGE DES LISIERS 61

2.1.1 Lisier de veau (A) *61*

2.1.2 Lisier de vache laitière-génisse (B) *62*

2.1.3 Lisier de vache laitière-génisse (C) *63*

2.1.4 Lisier de vache laitière-génisse (D) *63*

2.1.5 Lisier de vache laitière-génisse (E) *63*

2.2 DESCRIPTION DES ESSAIS 64

2.2.1 Tests de polymères (POL) *65*

2.2.1.1 Essais POL-1 66

2.2.1.2 Essais POL-2 67

2.2.1.3 Essais POL-3 67

2.2.2 Tests de tamisage et de dilution du lisier (TAM) *68*

2.2.3 Tests de température (TEM) *69*

2.2.4 Tests de vieillissement du lisier (AGE) *69*

2.2.5 Tests de durée de flottation (FLO) *69*

2.2.6 Tests de conditionnement/tamisage (CT) *69*

2.2.6.1 Tests de tamisage du lisier pour différentes teneurs en ST (E-CT-1) 70

2.2.6.2 Nouveaux tests de polymères (E-CT-2) 70

2.2.6.3 Tests d'enlèvement des particules fines de la fraction liquide (E-CT-3) 71

2.3 MÉTHODES ANALYTIQUES 71

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION 75

3.1 LISIER DE VEAU (A) 75

3.1.1 Tests de polymères (A-POL) 75

3.1.2 Tests de tamisage et de dilution du lisier (A-TAM) 82

3.1.3 Tests de température (A-TEM) 87

3.1.4 Tests de vieillissement du lisier (A-AGE) 91

3.1.5 Tests de durée de flottation (A-FLO) 91

3.1.6 Conclusion pour la flottation du lisier de veau (A) 94

3.2 LISIER DE VACHE-GÉNISSE (B) 94

3.2.1 Tests de polymères (B-POL) 94

3.2.2 Tests de tamisage et de dilution du lisier (B-TAM) 100

3.2.3 Tests de température (B-TEM) 104

3.2.4 Tests de vieillissement du lisier (B-AGE) 108

3.2.5 Tests de durée de flottation (B-FLO) 112

3.2.6 Conclusion pour la flottation du lisier de vache-génisse (B) 114

3.3 LISIER VACHE-GÉNISSE (C) 115

3.3.1 Tests de polymères (C-POL) 115

3.4 LISIER DE VACHE-GÉNISSE (D) 117

3.4.1 Tests de polymères (D-POL) 117

3.4.2 Tests de tamisage et de dilution du lisier (D-TAM) 122

3.4.3 Tests de température (D-TEM) 126

3.4.4 Tests de durée de flottation (D-FLO) 127

3.4.5 Conclusion pour la flottation du lisier de vache laitière-génisse (D) 127

3.5 LISIER DE VACHE-GÉNISSE (E) 128

3.5.1 Tests de polymères (E-POL) 128

3.5.2 Tests de conditionnement/tamisage (E-CT) 131

3.5.2.1 Tests de tamisage du lisier pour différentes teneurs en ST (E-CT-1) 131

3.5.2.2 Nouveaux tests de polymères (E-CT-2) 138

3.5.2.3 Enlèvement des particules fines de la fraction liquide (E-CT-3) 140

3.5.3 Conclusion pour le conditionnement/tamisage du lisier de vache-génisse E 143

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS 145

BIBLIOGRAPHIE 149

ANNEXE A 159

ANNEXE B 163

ANNEXE C 165

ANNEXE D 169

ANNEXE E 171

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 *Informations générales sur les lisiers bovins du Québec étudiés* 6
Tableau 1.2 *Caractéristiques du lisier de vache laitière* 10
Tableau 1.3 *Caractéristiques du lisier de veau* 11
Tableau 1.4 *Caractéristiques du lisier de porc* 11
Tableau 1.5 *Synthèse des détails techniques et économiques des technologies commercialisables* 32
Tableau 1.6 *Classification des procédés de flottation* 36
Tableau 1.7 *Critères d'évaluation des technologies émergentes* 46
Tableau 1.8 *Distribution et valeurs des cotes pour le calcul de l'indice composé de la qualité de la flottation* 48
Tableau 1.9 *Distribution et valeurs des cotes pour le calcul de l'indice composé de la mesure de la flottation* 49
Tableau 2.1 *Types et provenance des lisiers utilisés dans cette étude* 61
Tableau 2.2 *Description et codes des essais réalisés au cours de la recherche* 64
Tableau 2.3 *Description des polymères utilisés dans cette étude* 65
Tableau 2.4 *Grille d'évaluation de la qualité des flocs, de la séparation et du surnageant (Bélanger, 2002)* 66
Tableau 2.5 *Notations et descriptions de matières solides du lisier (Blais, 2006)* 72
Tableau 3.1 *Valeurs des indices ICQF et ICMF obtenues lors des essais A-POL-2 et A-POL-3** 77
Tableau 3.2 *Effet de la concentration de polymère Zetag 7557 lors de l'essai A-POL-2** 78
Tableau 3.3 *Effet de la concentration de polymère Zetag 7689 lors des essais A-POL-2** 79
Tableau 3.4 *Effet de la concentration de polymère Zetag 7557 lors des essais A-POL-3** 80
Tableau 3.5 *Dilutions du lisier A pour le test A-TAM* 83
Tableau 3.6 *Caractéristiques du lisier brut A1 lors des essais A-TAM* 83
Tableau 3.7 *Caractéristiques du lisier brut A2 lors des essais A-TAM* 83
Tableau 3.8 *Caractéristiques du lisier brut A3 lors des essais A-TAM* 84
Tableau 3.9 *Caractéristiques du lisier brut A4 lors des essais A-TAM* 84
Tableau 3.10 *Valeurs des indices ICQF et ICMF obtenues lors des essais A4-TAM** 85
Tableau 3.11 *Effet du tamisage et de la dilution lors des essais A4-TAM** 86
Tableau 3.12 *Valeurs des indices ICQF et ICMF obtenues lors des essais A-TEM** 88
Tableau 3.13 *Effet de la température lors des essais A-TEM** 89
Tableau 3.14 *Valeurs des indices ICQF et ICMF obtenues lors des essais A-FLO** 91
Tableau 3.15 *Effet de la durée de flottation lors des essais A-FLO** 92
Tableau 3.16 *Valeurs des indices ICQF et ICMF obtenues lors des essais B-POL-2 et B-POL-3** 95
Tableau 3.17 *Effet de la concentration de polymère 7654 lors des essais B-POL-2** 97
Tableau 3.18 *Effet de la concentration de polymère 7654 lors des essais B-POL-3** 98
Tableau 3.19 *Dilutions du lisier brut B lors des essais B-TAM* 100
Tableau 3.20 *Caractéristiques du lisier brut B1 lors des essais B-TAM* 101

Tableau 3.21 *Caractéristiques du lisier brut B2 lors des essais B-TAM* *101*
Tableau 3.22 *Valeurs des indices ICQF et ICMF obtenues lors des essais B-TAM** *102*
Tableau 3.23 *Effet du tamisage et de la dilution lors des essais B-TAM** *103*
Tableau 3.24 *Valeurs des indices ICQF et ICMF obtenues lors des essais B-TEM** *105*
Tableau 3.25 *Effet de la température lors des essais B-TEM** *106*
Tableau 3.26 *Valeurs des indices ICQF et ICMF obtenues lors des essais B-AGE** *109*
Tableau 3.27 *Effet du vieillissement du lisier lors des essais B-AGE** *110*
Tableau 3.28 *Valeurs des indices ICQF et ICMF obtenues lors des essais B-FLO** *112*
Tableau 3.29 *Effet de la durée de flottation lors des essais B-FLO** *113*
Tableau 3.30 *Dilutions du lisier brut C lors des essais C-POL-2 et C-POL-3* *116*
Tableau 3.31 *Caractéristiques des lisiers bruts lors des essais C-POL* *116*
Tableau 3.32 *Valeurs des indices ICQF et ICMF obtenues lors des essais D-POL-2** *117*
Tableau 3.33 *Effet de la concentration du polymère Zetag 7654 lors des essais D-POL-2** *119*
Tableau 3.34 *Effet de la concentration du polymère Percol 765 lors des essais D-POL-2** *120*
Tableau 3.35 *Dilutions du lisier brut D lors des essais D-TAM* *122*
Tableau 3.36 *Caractéristiques des lisiers bruts lors des essais D-TAM* *123*
Tableau 3.37 *Valeurs des indices ICQF et ICMF obtenues lors des essais D-TAM** *124*
Tableau 3.38 *Effet du tamisage et de la dilution lors des essais D-TAM** *125*
Tableau 3.39 *Caractéristiques du lisier brut lors des essais D-FLO* *127*
Tableau 3.40 *Valeurs des rapports $V_{S/L}$ obtenues lors des essais E-POL-2** *129*
Tableau 3.41 *Aspect des flocs du lisier lors des essais E-POL-2** *129*
Tableau 3.42 *Caractéristiques des fractions finales lors des essais E-POL-2** *130*
Tableau 3.43 *Caractéristiques des lisiers bruts lors des essais E-CT-1* *132*
Tableau 3.44 *Valeurs des ST, MES et rapports $V_{S/L}$ obtenues lors des essais E-CT-1 pour les fractions finales tamisées à 3 mm** *132*
Tableau 3.45 *Valeurs des ST, MES et $V_{S/L}$ obtenues lors des essais E-CT-1 pour les fractions finales tamisées à 1 mm** *133*
Tableau 3.46 *Effet du tamisage et de la dilution lors des essais E-CT-1 avec le lisier brut E1-NT** *135*
Tableau 3.47 *Effet du tamisage et de la dilution lors des essais E-CT-1 avec le lisier brut E2-NT** *136*
Tableau 3.48 *Effet du tamisage et de la dilution lors des essais E-CT-1 avec le lisier brut E3-NT** *137*
Tableau 3.49 *Effet de la concentration de polymère lors des essais E-CT-2** *139*
Tableau 3.50 *Effet de la concentration de polymère et du tamisage lors des essais E-CT-3 sans tamisage initial** *141*
Tableau 3.51 *Effet de la concentration de polymère et du tamisage lors des essais E-CT-3 avec lisier brut tamisé à 3 mm** *142*
Tableau 3.52 *Avantages et inconvénients escomptés de la nouvelle technologie* *148*

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 *Technologies de traitement du lisier de porc (Barrington, 1997)* *25*

Figure 1.2 *Position du procédé de traitement LISOX dans la chaîne de gestion du lisier* *34*

Figure 1.3 *Schéma d'un attelage floc-bulle* *37*

Figure 1.4 *Schématisation d'une molécule de polyacrylamide* *41*

Figure 1.5 *Schématisation d'une molécule de polymères cationiques* *42*

Figure 3.1 *Performances des polymères anioniques, neutres et cationiques en termes de séparation, de floculation et de surnageant lors des essais A-POL-1* *76*

LISTE DES ÉQUATIONS

Équation 1.1 *La nitritation* *13*
Équation 1.2 *La Nitratation* *13*
Équation 1.3 *Équation globale de nitrification* *13*
Équation 1.4 *Équation d'ammonification* *13*
Équation 1.5 *Vitesse ascensionnelle (V) d'un attelage floc-gaz* *38*
Équation 1.6 *Formule de l'indice composé de la qualité de la flottation* *47*
Équation 1.7 *Formule de l'indice composé de la mesure de la flottation* *48*
Équation 1.8 *Calcul de la concentration en N-org* *51*
Équation 1.9 *Calcul de la concentration en P-org* *52*
Équation 2.1 *Calcul de la concentration en MES* *72*
Équation 2.2 *Calcul de la concentration en SDB* *72*
Équation 2.3 *Calcul de la concentration en MESB* *73*

LISTE DES ABRÉVIATIONS

ACM	Amendements calciques ou magnésiens
APHA	American Public Health Association
ATP	Adénosine triphosphate
CF	Coliformes fécaux
CH_4	Méthane
CO_2	Dioxyde de carbone
DBO	Demande biochimique en oxygène
DCO	Demande chimique en oxygène
ESB	Encéphalopathie spongiforme bovine
E_{ST}	Enlèvement des solides totaux
F	Floculation
FL	Fraction liquide
FS	Fraction solide
H_2S	Sulfure d'hydrogène
ICMF	Indice composé de la mesure de la flottation
ICQF	Indice composé de la qualité de la flottation
LB	Lisier brut
LQE	Loi sur la qualité de l'environnement
MES	Matières en suspension
MS	Matière sèche
n.d.	Non déterminé
N_2O	Oxyde nitreux
NH_3	Azote ammoniacal (gaz)
$N\text{-}NH_4^+$	Azote ammoniacal
$N\text{-}NH_4/P_{tot}$	Rapport « azote ammoniacal/phosphore total »
N-NTK	Azote total Kjeldahl
N-org	Azote organique
PAM	Polyacrylamide
$P\text{-}PO_4^{3-}$	Ortho-phosphates
POR	Potentiel d'oxydoréduction
P_{tot}	Phosphore total
REA	Réglement sur les Exploitations Agricoles
$V_{S/L}$	Rapport « volume de solide/volume de liquide »
SD	Solide dissous
Se	Séparation
SO_2	Dioxyde de soufre
ST	Solides totaux
Su	Surnageant
Tr	Trouble : aucune distinction entre phases liquide et solide
UFC	Unité formatrice de colonies

LISTE DES ABRÉVIATIONS DES TRAITEMENTS

	Codes des lisiers
A	Lisier de veau de Saint Charles de Bellechasse
A1 ; A2 ; A3 ; A4	Essai de tamisage sur lisier A à trois teneurs en ST différentes
B	Lisier de vache-génisse mélangé de Saint Henri de Lévis
B1 ; B2	Essai de tamisage sur lisier B à trois teneurs en ST différentes
C	Lisier de vache-génisse mélangé de Saint Roch des Aulnaies (échantillonnage 1)
D	Lisier de vache-génisse mélangé de Saint Roch des Aulnaies (échantillonnage 2)
D1 ; D2	Essai de tamisage sur lisier D à trois teneurs en ST différentes
E	Lisier de vache-génisse mélangé de Saint Denis
E1 ; E2 ; E3	Essai de tamisage sur le lisier E à trois teneurs en ST différentes
NT	Lisier non tamisé
T1	Tamisage initial du lisier brut à 1 mm
T2	Tamisage initial du lisier brut à 2 mm
T3	Tamisage initial du lisier brut à 3 mm
T8	Tamisage initial du lisier brut à 8 mm
	Codes des essais
AGE	Tests de vieillissement du lisier
CT-1	Tests de conditionnement-tamisage 1
CT-2	Tests de conditionnement-tamisage 2
CT-3	Tests de conditionnement-tamisage 3
FLO	Tests de durée de flottation
POL-1	Pré-tests pour le choix du ou des polymères
POL-2	Tests de polymères avec la solution mère à 1 g L^{-1}
POL-3	Tests de polymères avec la solution mère à 5 g L^{-1}
TAM	Tests de tamisage et de dilution du lisier
TEM	Tests de temperature

INTRODUCTION

Depuis une vingtaine d'années, l'agriculture connaît une industrialisation sans précédent. Désormais, la production est spécialisée et intensive. Ce type de production engendre une pollution de plus en plus importante et très préoccupante notamment pour les élevages de bétail. En effet, quelque soit le domaine, l'élevage entraîne notamment la production de fortes quantités de lisiers, c'est-à-dire un mélange d'excréments d'animaux et d'une importante quantité d'eau (Banton *et al.*, 1994 ; Copeland et Zinn, 1998 ; Couture et Robert, 2003).

Ainsi, au Québec, la production porcine qui suscite encore de nombreuses préoccupations mises en évidence par le Ministère de l'Environnement dans le cadre du nouveau *Règlement sur les exploitations agricoles* (REA[1]) adopté le 15 juin 2002, détient la deuxième place dans le secteur agricole avec une production annuelle de plus de 7 millions de porcs (Statistiques Canada, 2006) sur 30 millions au Canada (Statistiques Canada, 2007a), ce qui génère environ 3,1 milliards de dollars canadiens en revenus pour tous les intervenants opérant depuis la production jusqu'à la transformation (FPPQ, 2003). Néanmoins, cette production porcine entraîne de fortes pollutions que ce soit de l'eau, du sol ou même de l'air. La gestion des surplus de lisiers produits pose des problèmes au niveau de l'entreposage et de l'épandage, qui reste le meilleur moyen de valoriser ces lisiers. Cet épandage, qui ne se fait pas toujours en respectant les normes (autant quantitatives que qualitatives), affecte de plus en plus la qualité de vie et la santé des populations rurales.

La production bovine tient également une grande place au Québec, même s'il n'y a pas eu d'augmentation depuis 5 ans. En effet, en 2007, le Québec comptait environ 1,5 x 10^6 têtes de bétail, sur 16,3 x 10^6 au Canada (Statistiques Canada, 2007b). De plus, le secteur laitier est, au Québec, la première industrie alimentaire. Après une diminution de la production suite à l'épisode de crise dû à l'encéphalopathie spongiforme bovine (ESB), celle-ci est en désormais en constante augmentation, contrairement à la production porcine qui diminue. Les problèmes de pollution

---

[1] Le Règlement sur les exploitations agricoles (REA) vise à atteindre un équilibre entre la capacité de support en phosphore des sols et la quantité épandue de matières fertilisantes (Ministère de l'Environnement, 2004).

rencontrés pour les élevages de porcs, bien que plus étudiés et mieux connus, ne sont pas une exception. La production de lisier engendrée par les élevages de bovins exerce également une forte pression sur l'environnement. Ainsi, au Québec, la quantité totale de lisier produite est en moyenne de 25 millions de tonnes/an, dont 7 millions de tonnes de lisier porcin/an. Il faut donc se poser la question du traitement des autres types de lisiers. Actuellement, la réglementation pour les lisiers bovins n'est pas aussi stricte que celle mise en place récemment pour le porc, mais il est évident que celle-ci évoluera rapidement, afin d'améliorer la protection de l'environnement et de la santé humaine.

Le lisier possède une valeur agronomique importante. Il constitue un engrais organo-minéral possédant d'excellentes qualités fertilisantes. Il est donc intéressant de mettre au point des technologies permettant d'en diminuer la charge polluante tout en conservant les qualités fertilisantes, afin de pouvoir l'utiliser sans risque comme engrais.

Différentes techniques permettent à la fois de traiter le lisier et d'utiliser ses propriétés agronomiques. Elles sont de nature mécanique, biologique, chimique, thermique ou physico-chimique. Certaines sont commercialisées (ou commercialisables), mais beaucoup en sont encore au stade de la recherche et du développement. Ces technologies sont souvent basées sur les méthodes employées pour le traitement des eaux usées (qui ont fait l'objet de nombreuses études et sont désormais bien établies).

La technologie LISOX faisant l'objet de cette étude est basée sur la séparation solide/liquide du lisier (Blais *et al.*, 2007). Elle s'appuie sur le principe de flottation naturelle des fines particules de solides contenues dans le lisier. Ainsi, cette technologie permet d'obtenir deux coproduits à partir du lisier brut : d'un côté un liquide utilisable comme fertilisant azoté, et allégé en phosphore, et de l'autre, un solide concentré en phosphore. Les deux coproduits ainsi obtenus possèdent chacun des caractéristiques permettant, selon le type de sol et de culture, d'apporter soit un engrais enrichi en azote, soit en phosphore. De plus, le coproduit solide est facilement exportable. Les installations nécessaires sont également simples à utiliser et les matériaux peu coûteux (Blais *et al.*, 2007). Les critères de performance pour le traitement du lisier de porc (Bélanger, 2002 ; Blais *et al.*, 2007) étaient d'obtenir un ratio azote ammoniacal / phosphore total ($N\text{-}NH_4/P_{tot}$) égal ou supérieur à 7 (CPVQ, 1996), une siccité pour la fraction solide supérieure à 100 g L^{-1} (Bélanger, 2002), une

teneur en MES pour la fraction liquide inférieure à 3 g L^{-1} (Blais *et al.*, 2007) et des coûts totaux pour LISOX inférieurs ou égaux à ceux du marché du traitement de lisier porcin (Bélanger, 2002).

Certains paramètres opératoires peuvent influencer la flottation biologique du lisier de porc par le procédé LISOX. Pour pouvoir élargir le champ d'action de la technologie LISOX et l'appliquer au lisier bovin, il apparaît donc nécessaire de réaliser des tests préliminaires en laboratoire, afin d'évaluer si cette technologie est fonctionnelle pour le lisier bovin et selon quels paramètres opératoires de flottation.

Ainsi, les premiers tests effectués dans le cadre des travaux en cours permettent de vérifier l'applicabilité de la technologie LISOX pour traiter des effluents provenant de la production bovine. De plus, comme il s'agit d'une technologie très récente, seuls quelques essais ont été réalisés par l'entreprise HET pour le moment. Les bases de cette étude ne se rapportant donc qu'au lisier de porc, les paramètres opératoires employés (concentration et type de polymère, tamisage et teneur en solides totaux, temps de réaction, température, vieillissement du lisier) peuvent différer pour le lisier bovin.

Afin de démontrer le potentiel de la technologie LISOX pour le traitement du lisier de bovin, nous présentons une revue de la littérature sur le traitement et la gestion du lisier bovin, suivie de la démarche méthodologique permettant d'atteindre nos objectifs de la présentation des résultats et leur discussion et d'une brève conclusion.

1. REVUE DE LITTÉRATURE

1.1 Définition et types de lisier

Le lisier de bovin est constitué principalement d'un mélange hétérogène de fèces et d'urines. Les eaux de lavage, les résidus alimentaires et la litière s'additionnent à ce mélange (Banton *et al.*, 1994 ; Copeland et Zinn, 1998 ; Couture et Robert, 2003).

Plus spécifiquement, le lisier de veau, constitué du même mélange, est cependant beaucoup plus dilué et faiblement chargé en matière sèche à cause de l'alimentation souvent liquide (Banton *et al.*, 1994).

La composition du lisier varie en fonction de facteurs intrinsèques aux bovins tels que l'espèce ou l'âge (Giroux et Grégoire, 2000). D'autres facteurs liés à la gestion de l'exploitation peuvent également influencer la qualité du lisier, comme le régime alimentaire (Lackley, 2004), la litière et le système d'évacuation du lisier (CRAAQ, 2003).

Désormais, le mode d'élevage traditionnel opérant de la gestation à la finition (Bélanger, 2002) tend à disparaître au Québec pour laisser place à la spécialisation des élevages, selon la catégorie (laitière ou de boucherie), l'âge et le sexe de l'animal. Ainsi, les lisiers auront des compositions variables. Au Québec, la production bovine est principalement laitière (Statistiques Canada, 2007b). Les exploitations sont composées de vaches et de génisses laitières. Les lisiers produits par les deux types d'animaux sont rarement traités séparément. Deux sortes de lisiers ont donc été retenues pour la présente étude, soit le lisier de veau et le lisier de vache laitière-génisse mélangé.

Le Tableau 1.1 présente des données sur la composition des élevages, le nombre de têtes (Statistiques Canada, 2007b), ainsi que le volume de lisier produit (CRAAQ, 2003) pour plusieurs catégories d'animaux au Québec et au Canada.

Tableau 1.1 Informations générales sur les lisiers bovins du Québec étudiés

Type de bovin	Nombre de têtes (x 1000)		Quantité de lisier ($L\ jr^{-1}\ animal^{-1}$)[2]
	Québec	Canada	
Veaux[1]	465	5555	11,5
Vaches laitières	400	1036	94,2
Vaches de boucherie	225	5216	
Génisses laitières	175	502	24,9
Génisses de boucheries	61	1993	
Génisses pour la reproduction	33	725	
Génisses pour le marché	28	1268	
Taureaux	14	269	
Bouvillons	117	1681	
Total	1455	16250	

1 La production de lisier pour les veaux tient compte ici uniquement des veaux de lait, qui correspond au type d'exploitation d'élevage du veau étudiée dans ce mémoire.

2 Noter que ces valeurs tiennent compte de l'apport par les eaux de précipitation, dont la quantité peut fortement varier selon l'exploitation. De plus, seule la gestion liquide des rejets a été prise en compte (teneur en eau contenue < 85 % à la sortie du bâtiment d'élevage (Ministère de l'Environnement, 2002).

1.2 Composantes du lisier de bovin

Le lisier contient des composés organiques dissous ou non comme des polysaccharides, des lipides, des protéines et des acides gras volatils, mais également un nombre important de composés inorganiques (Garcia-Ochoa *et al.*, 1999).

1.2.1 Éléments nutritifs

Le phosphore, l'azote, le carbone comptent parmi les éléments essentiels à la croissance des animaux et des végétaux. Les bovins ont également des besoins en calcium, magnésium, potassium et sodium (Léonard, 2001). Ce sont les éléments nutritifs retrouvés dans le lisier dont la concentration est la plus importante. Ils sont fournis par l'alimentation et ne sont pas entièrement assimilés par l'animal. En effet, les animaux laissent passer dans leurs déjections une grande partie

de ce qu'ils consomment. Ainsi, les bovins laitiers rejettent environ 71% de l'azote, 73% du phosphore et 90% du potassium contenus dans leur alimentation (Couture et Robert, 2003).

L'azote (N) contenu dans les protéines alimentaires fournit les acides aminés indispensables à l'animal pour assurer sa croissance et son entretien et pour produire le lait. Dans le lisier, il provient essentiellement de l'urine issue du métabolisme de l'animal, ainsi que des protéines alimentaires (Léonard, 2001 ; Wright et Mutsvangwa, 2003). Il se présente sous deux formes principales : en sels dissous comme l'ammonium, qui correspond à la fraction inorganique ou minérale, et en protéines qui constitue la fraction organique de l'azote (Barrington, 1997). Plus le lisier est sous forme liquide, plus l'azote sera sous forme ammoniacale (Couture et Robert, 2003).

Le phosphore (P) intervient principalement dans le transfert d'énergie cellulaire (ATP). Il est donc essentiel à la croissance des bovins (Léonard, 2001). Le phosphore contenu dans le lisier est principalement sous forme solide et inorganique. Une fraction du phosphore est sous forme soluble, principalement des phosphates inorganiques ($H_2PO_4^-$, HPO_4^{2-} et PO_4^{3-}).

Le calcium (Ca) permet la formation des os et des dents. Il est également essentiel pour de nombreux phénomènes physiologiques, comme la transmission des influx nerveux, les mouvements musculaires, etc. Le calcium constitue 2% du poids de l'animal (Léonard, 2001).

Le magnésium (Mg) est un constituant des os. De plus, il agit sur les neurotransmetteurs. Les besoins en Mg varient fortement selon l'âge de l'animal (Léonard, 2001).

Le potassium (K) intervient dans le bon fonctionnement des enzymes, des muscles, des tissus nerveux, ainsi que dans l'activité des microorganismes du rumen (Léonard, 2001). Il est en concentration généralement élevée dans le lisier.

Le sodium (Na) est apporté sous forme de sel dans l'alimentation. Il permet d'équilibrer l'osmose de l'organisme et est essentiel à la transmission d'influx nerveux (Léonard, 2001).

1.2.2 Matières organiques

Les lisiers de bovin ont une charge organique très élevée, comparativement aux eaux usées domestiques (Blais, 2006). Les matières organiques proviennent des parties non digérées des aliments, de la perte directe d'aliments, ainsi que des cellules microbiennes (Theobald, 1992).

1.2.3 Microorganismes

Lorsque le lisier est entreposé, il constitue un milieu anaérobie (Steinfeld *et al.*, 2006). Pour cette raison, la flore microbienne est constituée principalement de microorganismes anaérobies ou anaérobies facultatifs. Ces organismes anaérobies produisent des gaz qui se dégagent en surface (Steinfeld *et al.*, 2006), ce qui démontre leur activité métabolique. *Streptococcus* (Don et Donovan, 2002), *Bacillus*, *Bacteroides*, *Clostridium*, *Escherichia, Eubacterium*, *Proteobacteria* (Steinfeld *et al.*, 2006), *Caldanaerobacter* (Yokoyama *et al.*, 2007), *Salmonella* (Steinfeld *et al.*, 2006) sont les principaux groupes bactériens que l'on retrouve dans le lisier de bovin (Chachkhiani *et al.*, 2004). Du fait de la spécificité du système digestif des bovins (ruminants), certaines bactéries, propres à la flore interne de l'animal, se retrouvent dans le lisier comme, par exemple, celles de la famille des *Ruminococcus* (Yokoyama *et al.*, 2007).

1.2.4 Métaux lourds

Les métaux présents dans le lisier proviennent en très grande partie de l'alimentation du bétail (Nicholson *et al.*, 1999). Ce sont les compléments minéraux alimentaires qui apportent ces métaux, principalement du cuivre (Cu) et du zinc (Zn) (Nicholson *et al.*, 1999). Le cuivre est nécessaire pour la croissance de l'animal. Le zinc est essentiel pour le métabolisme du bétail (Léonard, 2001).

1.2.5 Médicaments

Les produits pharmaceutiques sont largement employés dans l'industrie bovine, principalement les antibiotiques et les hormones (Steinfeld *et al.*, 2006). Les antibiotiques sont donnés dans un but thérapeutiques, mais également pendant des périodes de stress pour l'animal, comme le transport, et tout au long de sa vie pour assurer sa bonne croissance (Steinfeld *et al.*, 2006). Les hormones sont employées pour augmenter l'efficacité d'absorption des aliments, et sont interdites dans de nombreux pays, surtout en Europe (FAO, 2003). Les hormones naturelles principales régulièrement utilisées sont : les estrogènes, la progestérone et la testostérone ; les hormones synthétiques sont : le Zéranol, l'acétate de Melengestrol et l'acétate de Trenbolone. Ces médicaments ne sont pas entièrement dégradés et se retrouvent en partie dans le lisier.

1.2.6 Inventaire des caractéristiques du lisier de bovin et différences essentielles avec le lisier de porc

Les Tableaux 1.2 et 1.3 présentent les principales caractéristiques moyennes du lisier de vache laitière et celle du lisier de veau (Banton, 1994 ; Barrington, 1997 ; Couture et Robert, 2003 ; Don et Donovan, 2002 ; Haase *et al.*, 2007 ; Hojjati et Nourbakhsh, 2007 ; Nicholson *et al.*, 1999 ; Sager, 2007 ; Shaffer et Cleveland, 2007 ; Singh, 2005).

Tableau 1.2 Caractéristiques du lisier de vache laitière

Paramètres	Minimums	Maximums
pH	6,30	8,60
Matière sèche (%)	7,20	33,4
N-NTK (mg N L^{-1})	1300	6900
P_{tot} (mg P L^{-1})	600	6900
N-NH_4 (mg N-NH_4 L^{-1})	700	2500
P-PO_4 (g P-PO_4 kg^{-1} MS)	2,28	3,72
K (g K kg^{-1} MS)	3,40	44,7
Cd (mg Cd kg^{-1} MS)	0,27	0,33
Cr (mg Cr kg^{-1} MS)	5,6	6,6
Cu (mg Cu kg^{-1} MS)	51,0	62,3
Ni (mg Ni kg^{-1} MS)	5,40	6,30
Zn (mg Zn kg^{-1} MS)	164	209
Coliformes fécaux (UFC par 100 mL)	$1,86 \times 10^7$	
Al (g Al kg^{-1} MS)[1]	1,67	
Ca (g Ca kg^{-1} MS)	20,6	
Fe (g Fe kg^{-1} MS)	1,97	
Mg (g Mg kg^{-1} MS)	9,30	
Na (g Na kg^{-1} MS)	3,59	
S (g S kg^{-1} MS)	5,10	
Ba (mg Ba kg^{-1} MS)	46,0	
Mn (mg Mn kg^{-1} MS)	180	
Pb (mg Pb kg^{-1} MS)	4,10	
Sr (mg Sr kg^{-1} MS)	59,0	

1 Les données pour lesquelles une seule valeur est fournie sont tirées de Sager (2007).

Tableau 1.3 Caractéristiques du lisier de veau

Paramètres	Valeurs
Matière sèche (%)	6,50
N-NTK (mg N L^{-1})	2900
P_{tot} (mg P L^{-1})	1400
N-NH_4 (mg N-NH_4 L^{-1})	2100
P-PO_4 (g P-PO_4 kg^{-1} MS)	4,81
K (mg K L^{-1})	2700
Ca (mg Ca L^{-1})	1900
Mg (mg Mg L^{-1})	300

Ces tableaux ne sont donnés qu'à titre indicatif, puisque les caractéristiques du lisier varient avec la race, la quantité de litière, la teneur en solides totaux, l'alimentation, etc. Ils permettent toutefois de comparer la composition des lisiers de bovin et de porc (Tableau 1.4).

Tableau 1.4 Caractéristiques du lisier de porc

Paramètres	Minimums	Maximums
pH	6,7	8,0
ST (%)	3,8	7,4
N_{NTK} (mg N L^{-1})	2500	13800
P_{tot} (mg P L^{-1})	100	2400
Cu (mg Cu kg^{-1} MS)	200	400
Zn (mg Zn kg^{-1} MS)	1012	1570
Coliformes fécaux (UFC par 100 mL)	$4,5 \times 10^4$	$1,1 \times 10^8$

Source : Bélanger (2002).

Le pH est une mesure de la concentration en ions hydrogènes (-log [H^+]) d'un effluent interprétée qualitativement selon l'échelle suivante : acide, neutre ou basique.

La matière sèche (MS) représente la partie restante une fois l'eau retirée du lisier. Elle est exprimée en % de la matière humide de départ sur la base du poid. Les matières solides du lisier sont exprimées par la concentration en solides totaux (ST). Les solides totaux sont la somme des matières en suspension (MES) et des matières dissoutes (SD) (Tableau 2.5). Pour les solides totaux, 1% ST = 10 g L^{-1}. La différence entre les ST et les MES représente les matières dissoutes du lisier. Selon Zhu *et al.* (2000), une séparation solide-liquide (comme pour Lisox) du lisier diminue la teneur en MES de la fraction liquide finale, mais n'a que peu d'effet sur les matières dissoutes. Afin d'obtenir une bonne séparation, les solides doivent se retrouver sous forme de MES et non de solides dissous dans le lisier (Zhu *et al.*, 2000). Même si le lisier frais contient une quantité élevée de solides en suspension, une fois stocké en anaérobiose, les bactéries commencent à le dégrader. Les bactéries vont d'abord consommer les matières dissoutes, plus facilement biodégradables, tout en hydrolysant les MES en SD pour permettre leur croissance (Zhu *et al.*, 2000). Ce phénomène entraîne, au cours du temps, une augmentation de la teneur en SD et une diminution des MES, qui diminuera les capacités de séparation solide-liquide au cours du procédé si le lisier est utilisé après un long temps de stockage (10 jours de conservation maximum) (Zhu *et al.*, 2000).

L'azote total (N-NTK) et le phosphore total (P_{tot}) incluent les formes solubles et solides. L'ammonium (NH_4^+) et les phosphates (PO_4^{3-}) sont les formes dissoutes principales. Par comparaison, on remarque une nette différence de concentration en azote total (N-NTK) dans les lisiers bovin et porcin. En effet, le lisier de porc est beaucoup plus concentré en azote. Il en est de même pour le cuivre et le zinc, fourni en quantité plus importante dans les rations d'élevages porcins. Par contre, les concentrations en phosphore total sont légèrement plus élevées en moyenne dans les lisiers de vache laitière.

L'azote du lisier est principalement sous forme ammoniacale ($N\text{-}NH_4$) (Blais, 2006). Les formes nitrites ($N\text{-}NO_2$) et nitrates ($N\text{-}NO_3$) sont peu ou pas présentes car le milieu est en général anaérobique, surtout pendant le stockage (Bisaillon *et al.*, 1984). De plus, la nitrification de l'azote ammoniacal (Équations 1.1, 1.2 et 1.3) en $N\text{-}NO_2$ et $N\text{-}NO_3$ nécessite la présence d'oxygène, ce qui signifie que l'on ne retrouvera pas ces formes dans le lisier stocké avant traitement, puisque le milieu est anaérobie. Les réactions de nitritation et de nitratation sont effectuées principalement par deux microorganismes autotrophes : *Nitrosomonas* et *Nitrobacter* (Blais, 2006). De plus, en

aérobiose (à la surface du lisier stocké), le N-NH_3 est relargué dans l'atmosphère par volatilisation (Ni, 1998). Une partie du N-NH_3 du lisier est généré par la biomasse au cours de leur activité enzymatique et microbienne (Ni, 1999), en utilisant l'azote organique (N-org). Cette réaction s'appelle l'ammonification (Équation 1.4).

Équation 1.1 Réaction de nitritation

$$NH_4^+ + 1{,}5\,O_2 \Rightarrow Nitrosomonas \Rightarrow NO_2^- + 2\,H^+ + H_2O$$

Équation 1.2 Réaction de nitratation

$$NO_2^- + 0{,}5\,O_2 \Rightarrow Nitrobacter \Rightarrow NO_3^-$$

Équation 1.3 Réaction globale de nitrification

$$NH_4^+ + 2\,O_2 \Rightarrow Nitrosomonas \Rightarrow NO_3^- + 2\,H^+ + H_2O$$

Équation 1.4 Réaction d'ammonification

$$N - org \Rightarrow N - NH_3$$

En l'absence d'oxygène, ce sont des bactéries dénitrifiantes hétérotrophes qui vont transformer les nitrates en azote gazeux (N_2). Cette réaction s'appelle la dénitrification (Blais, 2006). La séparation solide-liquide du lisier affectant peu les matières dissoutes, mais seulement les MES (Zhu *et al.*, 2000), la teneur en N-NH_4 (forme dissoute de l'azote) ne devrait pas beaucoup diminuer au cours du procédé. Cependant, si le lisier est âgé au moment des essais (après une importante période de stockage en anaérobiose), la teneur en matières dissoutes peut augmenter (Zhu *et al.*, 2000) et il est possible qu'on observe une augmentation de la concentration des formes dissoutes.

La concentration en orthophosphates ($H_2PO_4^-$, HPO_4^{2-} ou PO_4^{3-}) du lisier est plus importante que celle du phosphore organique solide (McDowel et Sharpley, 2002). Les phosphates peuvent se retrouver sous formes précipitée (peu soluble) ou cristalline (insoluble), par exemple en phosphates

de calcium, ou encore sous forme adsorbée et plus ou moins fixée aux particules du lisier (*Massé et al.*, 2006). Le manque de références sur les voies de transformation du phosphore dans le lisier de bovin nous ont contraint à mettre en avant le phénomène de déphosphatation biologique utilisé en traitement des eaux usées (Blais, 2006 ; Comeau, 1990). Dans un premier temps, pendant les phases d'anaérobiose les bactéries dites déphosphatantes consomment le substrat carboné en utilisant leur source de phosphore (polyphosphates) comme énergie, et relarguent du phosphore. Cette étape de la déphosphatation se déroulant en anaérobiose, il serait possible de l'observer dans le lisier. Lorsque par la suite l'eau usée subit une phase d'aérobiose, les bactéries reconstituent alors leurs réserves de polyphosphates, en quantité supérieure à celle relarguée, et entraînent ainsi la diminution de la teneur en $P\text{-}PO_4$ soluble dans les eaux usées (Blais, 2006). Cependant, il est beaucoup moins probable que cette phase se réalise dans le lisier (milieu très anaérobie). Le phosphore organique (P-org) peut, comme l'azote organique, être oxydé en présence d'oxygène (Comeau, 1990). Il est également possible que le phosphore organique soit hydrolysé par les microorganismes hétérotrophes du fumier, quelque soit la teneur en oxygène du milieu (Grant *et al.*, 2004). Cependant, ce phénomène nécessitant plus que quelques heures pour permettre d'observer une différence significative avant et après traitement, il est peu probable que nous l'observions ici. Comme pour la concentration en azote dissous ($N\text{-}NH_4$) dans la fraction finale liquide, si le lisier utilisé pour la séparation solide-liquide est âgé (plus de 10 jours de stockage en anaérobiose), la teneur en phosphates ($P\text{-}PO_4$) peut augmenter (Zhu *et al.*, 2000).

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

1.3 Types de gestion des rejets de lisier

La gestion du lisier va de la production de lisier, à l'entreposage (pré-fosse, fosse), à la reprise et à la disposition par épandage. Le lisier peut être sous forme solide ou liquide, selon sa teneur en matière sèche. Si cette teneur en eau est supérieure à 85%, le rejet est liquide et est appelé "lisier", ce qui est le cas lorsque peu de litière est utilisée et que les eaux de lavage sont incorporées au lisier

(Ministère de l'Environnement, 2002). En dessous de 85%, le rejet est un fumier solide (Ministère de l'Environnement, 2002 : REA, L.R.Q.,c. Q-2, r.11.1).

La gestion sous forme solide constitue le type de gestion standard dans le milieu de la production bovine (Natural Resources Canada (NRCan), 2004) et représente 57,3% pour l'industrie laitière (NRCan, 2004). La recherche sur le traitement et l'entreposage des effluents de bovin est encore peu développée. Pourtant, les exploitations bovines dont la taille est importante ont de plus en plus tendance à employer la gestion du lisier sous forme liquide (Ministère de l'Environnement, 2003).

1.3.1 Gestion sous forme liquide

La gestion sur lisier est employée le plus souvent pour les élevages à stabulation libre, pour lesquels il n'est pas nécessaire de changer de litière régulièrement. Les salles de vêlage et les parquets pour veaux produisent du lisier solide, mais en quantité trop faibles pour influencer la qualité finale du lisier. Les déjections peuvent être récupérées par une rigole sous-jacente à un plancher semi-latté, par des grattes ou encore par un système de nettoyage à l'eau des allées. Ce système consomme beaucoup d'eau et est peu utilisé sauf en complément des deux autres procédés (Barrington, 1997). Le lisier est évacué vers la pré-fosse puis vers la fosse extérieure sans toiture par pompage, par gravité et, plus rarement, par broyage. Le lisier est entreposé ainsi jusqu'à l'épandage (Barrington, 1997).

La gestion sous forme liquide au Canada est encore peu employée pour le lisier bovin. Elle tend à se développer avec l'agrandissement des exploitations (Ministère de l'Environnement, 2003 ; NRCan, 2004) en raison de sa mécanisation, de ses faibles coûts initiaux, de la réduction d'odeurs dans les bâtiments et des économies d'énergie (Bélanger, 2002). Le Ministère de l'Environnement (2003) estimait que la gestion liquide était employée pour 25% du total des déjections bovines en 2003.

Ce type de gestion pose toutefois le problème de l'utilisation de fortes quantités d'eau. De plus, l'eau de lavage provient souvent du système d'eau potable. La gestion sous forme liquide provoque également la dilution du lisier (Couture et Robert, 2003), pour lequel il est alors nécessaire de

disposer de fosses d'entreposage de grandes capacités. De plus, les volumes de lisiers à gérer lors de l'épandage deviennent énormes, et la valeur fertilisante du lisier est beaucoup plus variable.

1.3.2 Gestion sous forme solide-liquide

Ce type de gestion n'est pas encore développé pour le lisier de bovin, car la gestion du fumier sous forme solide-liquide fait appel à des technologies de traitement séparé des deux phases du lisier. Or, le traitement du lisier bovin est encore peu étudié par rapport au lisier de porc. Dans ce cas, la manutention des phases solide et liquide permet de réduire les volumes à gérer et à épandre, de bonifier les valeurs fertilisantes de chacune des phases et de pallier aux problèmes d'odeurs.

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% (REA, L.R.Q.,c. Q-2, r.11.1).

Au niveau pratique, la gestion sous forme solide fait appel à l'utilisation de litière : les animaux sont élevés sur de la paille ou de la sciure de bois en stabulation entravée (Barrington, 1997). Afin de récupérer le lisier, des convoyeurs à chaîne sont placés dans les caniveaux. La quantité importante de litière pour le lisier sous forme solide favorise le compostage directement dans le bâtiment. De plus, la manipulation des déjections est simplifiée. Les volumes à gérer sont également plus faibles. Le lisier conserve ses caractéristiques de fertilisant organique. Enfin, de façon globale, les fumiers solides produiront autant d'odeurs mais de nature moins toxique que les lisiers parce que leur décomposition est surtout aérobie (Sobel *et al.*, 1988). Les gaz produits par la décomposition aérobie sont oxydés et moins nocifs comparativement à ceux provenant de la décomposition anaérobie (Barrington, 1997).

1.4 Problématique de la gestion des rejets de lisier

Le problème de la gestion se pose lorsque la production de lisier, qui constitue un fertilisant riche en nutriments, est supérieure aux besoins des cultures, au moment de l'épandage (Hooda *et al.* 2000). Comme les exploitations fonctionnent de plus en plus sur un modèle d'élevage intensif, les volumes de lisier deviennent rapidement faramineux, par rapport aux surfaces d'épandage disponibles. Si les élevages sont concentrés sur une faible surface, la gestion des surplus de lisier peut devenir un enjeu régional pour l'environnement et la santé humaine, les eaux souterraines et de surface, l'air, les sols, les forêts et les milieux humides. Au Québec, où la gestion des lisiers bovins se fait principalement sous forme solide et où l'industrie bovine est encore de taille moyenne, ce problème est de moindre envergure que pour le lisier porcin.

1.4.1 Contamination des eaux

La pollution de l'eau peut être de nature ponctuelle ou diffuse (Ministère de l'Environnement, 2003). La première provient de sources bien définies et identifiables comme les décharges illégales de polluants (Blais, 2006) ou les effluents de certaines usines. Dans ce cas, le polluant est concentré dans l'effluent rejeté. La seconde est plus difficile à contrôler (Bonn, 2003 ; Ministère de l'Environnement, 2003), car il s'agit généralement de doses appliquées régulièrement sur de grandes surfaces. Le polluant est donc beaucoup plus dispersé.

Le problème de la pollution diffuse d'origine agricole est de plus en plus préoccupant, principalement dans les régions où se concentrent les élevages intensifs (Gangbazo *et al.*, 1999 ; Ministère de l'Environnement, 2003). Cette pollution est essentiellement liée à l'épandage des surplus de lisiers sur les terres agricoles. Cette pollution est contrôlée en partie 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). De plus, la sévérité de la pollution varie selon le choix de la période et de la méthode d'épandage.

Le transport et la dispersion des polluants dans l'environnement se fait par les mécanismes suivants : l'écoulement superficiel ou ruissellement vers les rivières ou lacs ; la percolation verticale à travers la zone non-saturée jusqu'à la nappe phréatique ; le mouvement latéral de la nappe phréatique par l'entremise ou non des drains agricoles vers les eaux de surface (Banton *et al.*, 1994 ; Ministère de l'Environnement, 2003). De nombreux facteurs influencent également les quantités de polluants transportés comme le climat, les propriétés du sol, la géologie du site, les pratiques agricoles et les différentes formes d'utilisation du territoire (Banton *et al.*, 1994).

1.4.1.1 Eaux de surface

En milieu agricole, l'érosion des sols et le ruissellement sont les principales voies de transport des polluants vers les eaux de surface. Les matières transportées dans ce cas sont principalement le phosphore soluble et les matières en suspension (Lavoie *et al.*, 1994). Le phosphore dans les eaux de surface favorise l'eutrophisation des cours d'eau (Comeau, 1990 ; McDowell et Sharpley, 2002 ; Ministère de l'Environnement, 2003 ; Steinfeld *et al.*, 2006), puisqu'il est souvent le facteur limitant de l'eutrophisation des rivières au Québec en présence d'excès d'azote (Comeau, 1990 ; Gangbazo *et al.*, 1999).

Le lisier qui contient de nombreux microorganismes (Muirhead *et al.*, 2004), présente aussi un risque de contamination des eaux de surface par des microorganismes pathogènes (Chynoweth *et al.*, 1999 ; Ministère de l'Environnement, 2003 ; Steinfeld *et al.*, 2006). Steinfeld *et al.* (2006) font remarquer que les résidus d'antibiotiques présents dans le lisier entraînent le développement de résistances chez certains microorganismes.

De même, les hormones résiduelles facilement transportées vers les cours d'eau peuvent causer la féminisation ou la masculinisation de poissons et augmenter les cas de cancers du sein ou des testicules (Soto *et al.,* 2004).

1.4.1.2 Eaux souterraines

Le lessivage des nitrates représente la principale cause de pollution des eaux souterraines par les épandages de lisier (Lavoie *et al.*, 1994 ; Ministère de l'Environnement, 2003). En effet, les nitrates possèdent une charge négative comme les particules de sol et, ne pouvant s'y fixer, sont lessivés par l'eau (Barrington, 1997). L'azote présente un risque pour la santé humaine quand il se retrouve dans l'eau potable sous forme de nitrates (Wright et Mutsvangwa, 2003). Pour le lisier de bovin, plus ses caractéristiques se rapprochent de celles d'un fumier, plus l'azote s'y retrouve sous forme organique difficile à lessiver (Robert et Couture, 2000).

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 ; Steinfeld *et al.*, 2006). Dans ce cas, plus l'apport en phosphore est important, plus le sol est saturé, et plus le risque de lessivage augmente (Steinfeld *et al.*, 2006). Comme le phosphore est sous forme liée, le principal mode de transport est l'érosion des sols agricoles (Steinfeld *et al.*, 2006).

Là encore, comme les eaux de surface sont liées aux eaux souterraines, une contamination par des microorganismes est possible (Ministère de l'Environnement, 2003), ainsi qu'un transport des résidus de médicaments vétérinaires.

1.4.2 Pollution de l'air

Le lisier génère des polluants atmosphériques à l'intérieur du bâtiment d'élevage, à l'entreposage et lors de l'épandage. Lorsque le lisier est frais, les risques de contamination sont plutôt faibles. Par contre, pendant la période de stockage qui peut durer plusieurs semaines à plusieurs mois, il est attaqué par des bactéries anaérobies qui produisent divers gaz, dont certains sont dangereux (Ministère de l'agriculture de l'alimentation et des affaires rurales de l'Ontario (MAAARO), 1998 ; Steinfeld *et al.*, 2006). Si le lisier est stocké dans un réservoir couvert, les gaz peuvent s'accumuler au sommet du réservoir ou former des bulles et des vapeurs dissoutes qui restent emprisonnées (MAAARO, 1998). Le bâtiment d'élevage est un espace clos, où les polluants peuvent aussi s'accumuler. Avant et durant l'épandage, le brassage entraîne une dispersion importante des

polluants dans l'air. Les plus dangereux de ces gaz sont le sulfure d'hydrogène (H_2S), le dioxyde de carbone (CO_2), l'ammoniac (NH_3) et le méthane (CH_4) (MAAARO, 1998 ; Steinfeld *et al.*, 2006).

La pollution atmosphérique engendre des problèmes environnementaux. Tout d'abord, les activités agricoles demeurent une source importante de gaz à effet de serre (GES) et sont responsables de plus de la moitié des émissions d'oxyde nitreux (N_2O), le tiers des émissions de méthane (CH_4) et une faible quantité de gaz carbonique (CO_2) (Fédération des producteurs de bovins du Québec (FPBQ), 2006). De plus, en présence de l'humidité atmosphérique et d'oxydants, le dioxyde de soufre (SO_2) et les oxydes d'azote forment des acides sulfurique et nitrique (Steinfeld *et al.*, 2006), qui peuvent entraîner l'acidification des sols et de l'eau (ApSimon et Kruse-Plass, 1991). Ces acides peuvent également attaquer certains matériaux, et sont nocifs pour le système respiratoire de l'homme (Steinfeld *et al.*, 2006). Ils retombent sur le sol sous forme de pluie et de neige acides ou encore de particules sèches qui se déposent, ce qui entraîne des dommages non seulement aux cultures et aux forêts, mais également aux lacs et cours d'eau, empêchant ainsi la vie aquatique de s'y développer (Steinfeld *et al.*, 2006). Selon Bouwman et Van Vuuren (1999), les dépôts d'azote amènent un risque d'eutrophisation des lacs, et augmentent la lixiviation des nutriments. Les odeurs émises par le fumier et le lisier de bovin ont peu été étudiées jusqu'à présent, sans doute à cause des raisons suivantes :

- Au Québec, les excréments et urine des bovins sont principalement gérés sous forme solide, ce qui limite les productions d'odeurs. En effet, tous les fumiers, qu'ils soient solides ou liquides, dégagent une odeur mais le fumier solide en produit deux fois moins que le fumier liquide (Ministère de l'Environnement, 2003);
- La règlementation sur la qualité du lait oblige les producteurs laitiers à évacuer régulièrement les lisiers, ce qui permet de contrôler les odeurs dans l'étable (Barrington *et al.*, 1997);
- Lors de l'entreposage, les lisiers de bovins forment une croûte superficielle qui bloque l'émanation des odeurs (Barrington *et al.*, 1997);
- Les producteurs laitiers possèdent généralement assez de terres pour l'épandage du lisier à des doses modérées (Ministère de l'Environnement, 2003).

Dans la production bovine, la question des odeurs concerne plus particulièrement les élevages de veaux de lait, de veaux de grain et de bouvillons d'abattage (FPBQ, 2003), pour lesquels la gestion des effluents se fait généralement sous forme liquide. Les odeurs sont surtout produites autour des bâtiments d'élevage, mais également lors de l'épandage. Elles sont essentiellement causées par l'ammonium volatilisé, mais aussi, entre autre, par des composés organiques volatils et le sulfure d'hydrogène (Steinfeld *et al.*, 2006). Il n'est pas seulement question de nuisance olfactive. Il est reconnu que les molécules odorantes nuisent aussi à la santé humaine. Les personnes présentant le plus de risques sont les travailleurs agricoles.

1.4.3 Dégradation des sols agricoles

La contamination d'un sol lors de l'épandage de lisier peut réduire son potentiel agricole. Plusieurs contaminants potentiels peuvent accroître la production agricole, mais deviennent dangereux lorsqu'ils sont trop abondants dans le sol. Ainsi, de faibles quantités de cuivre, de molybdène et de sélénium sont essentielles à la croissance des plantes et des animaux; toutefois, si ces métaux sont présents en concentrations élevées, ils peuvent devenir toxiques (Acton et Gregorich, 1995 ; Ministère de l'Environnement, 2003).

1.5 Stratégies environnementales de gestion du lisier

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

Afin de faire face aux contraintes économiques et réglementaires et préalablement à la mise en place de nouvelles technologies de traitement du lisier, les entreprises bovines doivent, dans un premier temps, améliorer la gestion du lisier, de la production à l'épandage. Ces améliorations passent par l'atténuation de la charge fertilisante, du volume et des odeurs du lisier.

1.5.1.1 Diminution de la charge en éléments fertilisants du lisier

Il est possible de gérer correctement l'apport en éléments fertilisants dans l'alimentation du bétail. Le défi pour les producteurs et les nutritionnistes est de formuler des rations performantes qui minimisent les impacts environnementaux associés aux rejets (Steinfeld *et al.*, 2006). Par exemple, comme l'azote non assimilé se retrouve principalement dans l'urine, plus la diète est concentrée en azote, plus la quantité d'azote augmentera dans le lisier (Steinfeld *et al.*, 2006). Il est possible de synchroniser l'apport en nutriments et les besoins de l'animal. Ainsi, l'emploi d'aliments facilement digestibles est une option (United States Department of Agriculture (USDA), 2004). Le Livestock and Poultry Environmental Stewardship (LPES, 2005) propose de compléter les rations alimentaires avec des enzymes et des vitamines qui permettent d'augmenter la disponibilité du phosphore ; de remplacer une partie des protéines par des acides aminés, mieux assimilables ; de diminuer la taille des particules alimentaires et d'améliorer leur enrobage ; de réduire le stress des animaux et, enfin, d'améliorer la génétique des bovins (FAO, 1999 ; LPES, 2005). De plus, une bonne gestion de l'alimentation des bovins a permis de réduire efficacement les émanations de méthane qui sont un sous-produit normal du processus de digestion des herbivores. Selon le Ministère de l'Environnement (2003), de 1990 à 2000, les émissions du bétail ont ainsi diminué de 11% grâce aux améliorations dans le mode d'alimentation.

1.5.1.2 Diminution du volume de lisier produit

Afin de diminuer les volumes de lisier produits, il est nécessaire d'améliorer les systèmes de collecte de lisier. Ainsi, un plancher latté par lequel le lisier s'écoule permet de réduire l'apport en eau de lavage et de diminuer le volume final de lisier (Steinfeld *et al.,* 2006). Lors du stockage, l'ajout d'une toiture sur les réservoirs extérieurs permet également d'intercepter les eaux de pluie (LPES, 2005), de conserver l'azote et d'atténuer les odeurs pendant le stockage. Il est également possible d'utiliser des systèmes de trémies-abreuvoirs et des bols économiseurs d'eau.

1.5.1.3 Atténuation des odeurs

Les odeurs sont produites aux bâtiments d'élevage et à l'entreposage, mais aussi pendant l'épandage (Ministère de l'Environnement, 2003). Il existe divers moyens pour réduire les odeurs au niveau des infrastructures (Barrington, 1997) : la réduction de la surface d'exposition à l'atmosphère, pour le moins de transfert possible des gaz, l'utilisation d'additifs pour réduire les odeurs ou encore la gestion du type de ration alimentaire en évitant les aliments qui se décomposent en gaz odorants (comme le soufre). Quant à l'épandage, il est possible de limiter les odeurs en utilisant notamment des rampes basses et en incorporant le lisier rapidement au sol.

1.5.2 Traitement du lisier à implanter

Quand il n'est plus possible de répondre aux exigences environnementales à l'aide des mesures d'amélioration de la gestion du lisier, il est alors nécessaire de modifier le mode de gestion en implantant une technologie de traitement. Pour être applicable sur l'exploitation, les procédés de traitement doivent être simples, faciles à opérer, fiables, économiquement rentables et facile à intégrer aux opérations régulières.

Le traitement du lisier de vache n'étant pas encore un sujet de préoccupations, il existe peu de données sur les technologies. Cependant, on peut avancer que si ces technologies se développaient, elles pourraient être proches, techniquement, de celles en place ou en cours de développement pour le lisier de porc pour lequel des traitements assez poussés existent déjà (Tableau 1.5).

Dans le cas du lisier de porc, le traitement permet d'augmenter le taux d'acceptabilité[2] du lisier afin d'exploiter une plus grande superficie d'épandage (Les Consultants BPR, 1994). Généralement, la gestion sous forme solide-liquide est l'option la plus intéressante, car elle permet de concentrer les éléments fertilisants dans une fraction solide à haute valeur ajoutée tout en épurant la fraction

---

[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.

liquide (Bélanger, 2002). L'autre alternative est essentiellement la gestion sous forme solide décrite antérieurement.

Le traitement du lisier porcin se présente 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 (Bélanger, 2002).

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 utilisables comme fertilisants, amendements ou autres. La dérogation à au moins un de ces critères fait en sorte que le traitement est partiel (Bélanger, 2002).

1.6 Technologies de traitement existantes

Le traitement du lisier vise à transformer le lisier physiquement, biologiquement ou chimiquement. Pour être économiquement et technologiquement viables, la plupart des procédés nécessitent une grande quantité de lisier et ne peuvent donc pas être techniquement implantés sur la plupart des exploitations. La faisabilité des procédés de traitement à grande ou moyenne échelle dépend également de facteurs locaux comme la législation, le prix des fertilisants et le coût du procédé (FAO, 1999). Les procédés de traitement doivent aussi être simples, faciles à opérer et fiables. Ils doivent s'intégrer aux opérations régulières sans grandes modifications (Day et Funk, 1998).

Les procédés à l'étude actuellement sont souvent inspirés des technologies utilisées en assainissement des eaux usées. Les technologies sont classées selon que les procédés sont mécaniques, biologiques, chimiques, thermiques ou physico-chimiques (Day et Funk, 1998).

La Figure 1.1 résume les diverses technologies de traitement, ainsi que l'utilisation finale des fractions traitées. Cette présentation n'est pas exhaustive car les techniques de valorisation du lisier évoluent rapidement. De plus, Day et Funk (1998) fournissent, dans leur publication, des données détaillées sur les ouvrages de traitement du lisier.

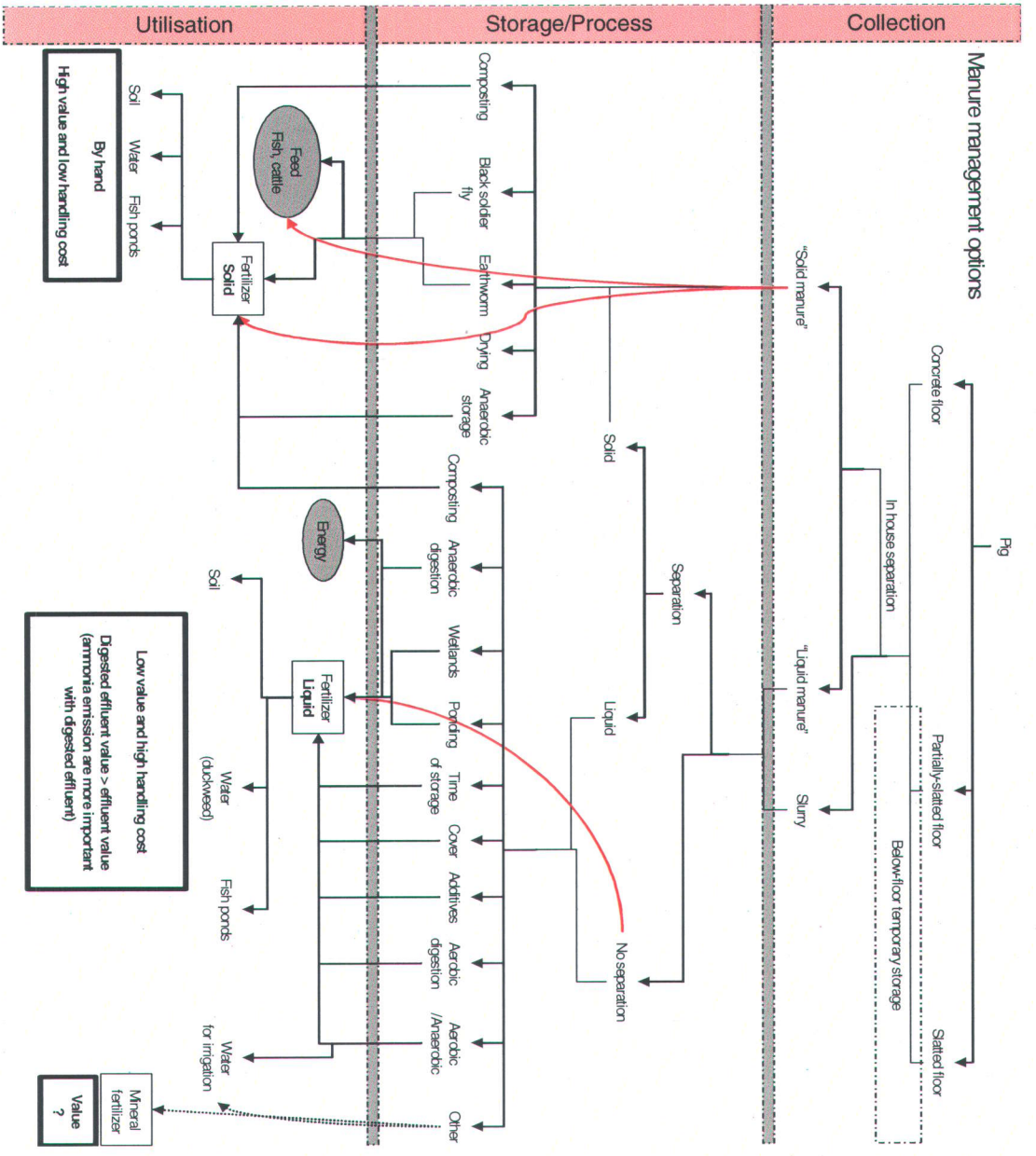

Figure 1.1 Technologies de traitement du lisier de porc (Barrington, 1997)

1.6.1 Procédés mécaniques

Ces procédés étant adaptés à la séparation du lisier liquide ou semi-solide, ils sont pour le moment peu connus pour le traitement du lisier de bovin. Cependant, la tendance générale à l'augmentation de la taille des cheptels bovins incite les éleveurs à se tourner de plus en plus vers une gestion liquide des déjections bovines Ministère de l'Environnement, 2003).

1.6.1.1 Séparation mécanique

Les techniques mécaniques de séparation comprennent les tamis, les cribleurs, les presses, les centrifugeuses et les toiles filtrantes (Day et Funk, 1998). Le principe est de séparer la phase liquide de la phase solide en retenant les particules solides du lisier. Les presses et les centrifugeuses appliquent une pression sur la fraction liquide pour faire sortir le liquide, tandis que les tamis et les toiles filtrantes n'exercent aucune pression (Bélanger, 2002).

1.6.1.2 Filtration

La filtration est un procédé mécanique classé selon la taille des particules retenues : l'osmose (1 à 10 Angström), l'ultrafiltration (10 à 1000 Angström), la nanofiltration et la microfiltration (1000 à 100 000 Angström) (Bélanger, 2002).

1.6.2 Procédés biologiques

1.6.2.1 Traitement aérobie

Ce type de traitement nécessite le développement d'une flore microbienne aérobie permettant l'oxydation de la matière organique du lisier et la diminution de la demande biologique en oxygène (DBO) et de la demande chimique en oxygène (DCO). De façon globale, 50% du carbone est converti en biomasse récupérée par sédimentation. Le phosphore est également réduit par

absorption biologique mais à un niveau moindre. La matière organique oxydée est transformée en nouvelles cellules microbiennes, en dioxyde de carbone et en eau. Afin de stimuler la croissance et l'activité de dégradation des microorganismes, un système d'aération apporte de l'oxygène (Bélanger, 2002 ; Steinfeld *et al.*, 2006). Différents types de traitements aérobies existent, comme les boues activées, les lits bactériens, le fossé d'oxydation, le lagunage aéré (Bélanger, 2002 ; Day et Funk, 1998 ; Steinfeld *et al.*, 2006), avec possibilité de réaliser une aération séquentielle afin d'obtenir des phases anaérobies pour un traitement combiné par aérobiose et digestion anaérobie (LPES, 2005).

1.6.2.2 Traitement anaérobie

La digestion anaérobie permet, en milieu dépourvu d'oxygène libre, la dégradation et la stabilisation de la matière organique, la réduction de la DCO et de la DBO (Steinfeld *et al.*, 2006), ainsi que la production de biogaz (un mélange de dioxyde de carbone et de méthane) et d'une biomasse microbienne (Kelleher *et al.*, 2000). C'est pourquoi cette technologie est déjà répandue pour la production de biogaz dans les exploitations bovines, notamment en Europe. Par contre, aucun enlèvement d'azote et de phosphore n'est possible. Le traitement anaérobie est réalisé en deux phases, soit une phase d'acidogenèse et une phase de méthanogenèse, chacune faisant appel à des microorganismes et des conditions différentes. Il y a tout d'abord une production d'acides gras volatils (acide acétique, propionique, butyrique) (d'où le terme acidogenèse), d'hydrogène et de dioxyde de carbone. Ces acides gras volatils sont ensuite transformés en gaz sous forme de méthane (70%) et de dioxyde de carbone (30%), au cours de la méthanogenèse (Chynoweth *et al.*, 1999 ; Blais, 2006). Il est fréquent que la dégradation du lisier de vache commence pendant le stockage (Chachkhiani *et al.*, 2004). Les procédés thermophiles (50-60°C) sont principalement utilisés à petite échelle dans des réacteurs assez "rustiques", avec une faible production de biogaz (Chachkhiani *et al.*, 2004). Au contraire, les procédés mésophiles (30-40°C) sont plutôt mis en place à grande échelle, et ce sont les plus courants. Le taux de production de biogaz est plus élevé pour les traitements anaérobies mésophiles, et de plus, ils permettent de réduire les risques sanitaires lors de l'utilisation du lisier traité (Ahring *et al.*, 2001). De plus, les microorganismes thermophiles ont un taux de croissance spécifique 2 à 3 fois plus élevés que celui de la flore

mésophile (Mladenovska et Ahring, 2000). Par contre, plus la température augmente, moins le procédé est stable. D'après Bélanger (2002), des recherches sur le traitement du lisier de porc sont en cours pour la mise au point de procédés psychrophiles (5-20°C).

1.6.2.3 Compostage

Ce procédé a été assez développé pour les exploitations bovines en gestion solide. Le compostage est un procédé naturel aérobie qui se fait en deux phases : la décomposition de la matière organique et la maturation (Day et Funk, 1997 ; Bélanger, 2002). Ce procédé de traitement peut être appliqué à du lisier, mais dans ce cas, contrairement au fumier solide, il sera nécessaire d'ajouter un substrat riche en fibres et en carbone afin, notamment, d'en diminuer l'humidité (Barrington, 1997). De plus, dans certains cas, des enzymes et des inoculums de microorganismes sont ajoutés pour améliorer le procédé.

Ce traitement mène à la production de dioxyde de carbone et d'eau. Le produit final, composé de matières organiques stabilisées et de minéraux, est proche de l'humus (Day et Funk, 1998 ; Steinfeld, 2006). La hausse de température pendant la phase de maturation permet également d'éliminer les graines et les pathogènes.

Le vermicompostage fait appel à des vers. L'espèce la plus couramment utilisée est *Eisenia foetida* (Garg *et al.*, 2006). Les vers de terre fragmentent le lisier et accélèrent le taux de décomposition de la matière organique tout en la stabilisant. Le lisier transformé en humus riche en nutriments est appelé vermicompost (Garg *et al.*, 2006 ; LPES, 2005).

1.6.2.4 Marais filtrants (ou marais épurateur)

Ce procédé employé aux États-Unis et en Europe l'est peu au Canada. Le marais filtrant agit comme un filtre pour épurer le lisier. Dans ce système, les plantes aquatiques des marais (les macrophytes) et les microorganismes entraînent des transformations physiques (sédimentation), biologiques (activités microbiennes) et chimiques (précipitation des métaux lourds) permettant de réduire la

charge en éléments fertilisants du lisier, la teneur en solides, ainsi que celle de métaux lourds. Les plantes envoient de l'oxygène dans le fond vaseux permettant la digestion aérobie de la matière organique. Elles servent aussi de support aux bactéries aérobies et anaérobies (Weil et Kollaard, 1995). Par contre, les macrophytes doivent être récoltées à la fin de chaque saison végétative pour empêcher un retour des fertilisants au fond du marais, et ainsi une saturation du milieu récepteur (Bélanger, 2002). De même, le fond du bassin doit être nettoyé régulièrement pour éviter l'accumulation de matière organique.

1.6.3 Procédés chimiques

1.6.3.1 Acidification, oxydation et chaulage

Ces procédés changent la composition physique, chimique et biologique du lisier. 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 (Bélanger, 2002). L'utilisation de chaux permet également d'augmenter la valeur agronomique du lisier (LPES, 2005).

1.6.4 Procédés thermiques

1.6.4.1 Séchage

Le principe de ce procédé est de sécher le lisier pour évaporer la phase liquide. Le produit final est un solide riche en fertilisants qui peut être mis en cube ou en granule (Bélanger, 2002). Cependant, il est plutôt employé lors d'une gestion solide du lisier pour éviter des coûts de chauffage importants. Dans les pays au climat chaud et sec, un séchage naturel est envisageable en dehors des périodes de pluie à un coût minimal (Steinfeld, 2006).

1.6.5 Procédés physico-chimiques

1.6.5.1 Oligolyse

Ce traitement consiste à appliquer un courant électrique au lisier à travers un ensemble d'électrodes. Par exemple, si on utilise une électrode de fer, le courant enlève les particules de fer de l'anode. Une fois ces ions dans le lisier, ils se combinent notamment avec les ions sulfures et précipitent. Ce procédé réduit la production d'ions sulfures dans le lisier qui sinon se combinent avec l'hydrogène pour former du sulfure d'hydrogène, un des gaz les plus odorants du lisier (Government of Alberta, 1997). Il est donc principalement employé pour la réduction des odeurs mais n'est pas, pour le moment, utilisé pour traiter le lisier de bovin.

1.6.5.2 Décantation avec coagulation et/ou floculation

Ce procédé de traitement fait appel à deux principes : un traitement physique de séparation en deux phases par gravité et un traitement chimique par ajout de coagulants et de floculants (Bélanger, 2002). Lors de la sédimentation, la vitesse du courant doit être assez lente pour permettre aux solides les moins denses de décanter (LPES, 2005). Le coagulant agit au niveau de la charge des particules colloïdales soit en les neutralisant, soit en leur fixant une charge positive ou négative conduisant à l'agrégation des particules. L'ajout de floculant favorise la formation de flocs en agglutinant les particules colloïdales chargées ou non (Bélanger, 2002). Par la suite, les éléments décantées et agglomérés en flocs sont séparés du lisier.

Les coagulants les plus utilisés sont le sulfate d'aluminium et le chlorure ferrique (Steinfeld, 2006). Les floculants sont soit des produits organiques naturels (cellulose ou chitosane) ou synthétiques (polyélectrolytes non ioniques, anioniques, ou cationiques) (Bolto et Gregory, 2007).

1.6.6 Technologies de traitement commercialisables

Les principales technologies commercialisables présentées au Tableau 1.5 ont été répertoriées par la FPPQ (2005) dans le Plan Agroenvironnemental de la production porcine. Ce plan date de 2005, mais les technologies plus récentes sont également présentées par la FPPQ. Le tableau présente le nom de la technologie, la date des informations fournies, la nature du procédé principal, l'échelle d'application, le type de traitement et la ventilation (immobilisation et opération) des coûts[3]. Il n'existe pas de telles données pour le lisier de bovin. On présume que lorsque la réglementation imposera le traitement du lisier aux producteurs bovins, ceux-ci se tourneront vers les technologies existantes pour le traitement du lisier de porc.

---

[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 1.5 Synthèse des détails techniques et économiques des technologies commercialisables

Technologies	Nature du procédé	Échelle d'application	Types de traitement	Coûts	
Biorek® 11/2001	Biologique : digestion anaérobie	Ferme (moy. et grande) et régional (centralisé)	Complet (sur la fraction liquide)	Immobilisation :	10-15 $\$\cdot m^{-3}$
				Opération :	5-10 $\$\cdot m^{-3}$
				Totaux[a] :	*15-20* $\$\cdot m^{-3}$
Sol. Biofertile-C 03/2003	Biologique : digestion aérobie	Ferme (grande) et régional (centralisé)	Complet (sur la fraction liquide)	Immobilisation :	5-10 $\$\cdot m^{-3}$
				Opération :	5-10 $\$\cdot m^{-3}$
				Totaux[b] :	*10-15* $\$\cdot m^{-3}$
Sol. Biofertile-F 03/2003	Biologique : digestion aérobie	Ferme et semi-centralisé	Complet (sur la fraction liquide)	Immobilisation :	10-15 $\$\cdot m^{-3}$
				Opération :	< 5 $\$\cdot m^{-3}$
				Totaux[c] :	*10-15* $\$\cdot m^{-3}$
Manurex (Purin Pur) 11/2001	Mécanique : séparation mécanique et filtration	Non disponible	Complet (sur la fraction liquide)	Immobilisation :	10-15 $\$\cdot m^{-3}$
				Opération :	< 5 $\$\cdot m^{-3}$
				Totaux[c] :	*10-15* $\$\cdot m^{-3}$
Technologie Carbofil 05/2005	Biologique : digestion aérobie	Non disponible	Partiel	Immobilisation :	10-15 $\$\cdot m^{-3}$
				Opération :	< 5 $\$\cdot m^{-3}$
				Totaux[c] :	*10-15* $\$\cdot m^{-3}$
Bio-Terre Systems Inc. 04/2004	Biologique : digestion anaérobie	Non disponible	Partiel (production de biogaz)	Immobilisation :	10-15 $\$\cdot m^{-3}$
				Opération :	< 5 $\$\cdot m^{-3}$
				Totaux[c] :	*10-15* $\$\cdot m^{-3}$
SLS Technologies 08/2004	Mécanique : séparation mécanique (floculation et centrifugation)	Non disponible	Partiel	Immobilisation :	10-15 $\$\cdot m^{-3}$
				Opération :	< 5 $\$\cdot m^{-3}$
				Totaux[c] :	*10-15* $\$\cdot m^{-3}$
Fan Séparateur 08/2004	Mécanique : séparation mécanique	Non disponible	Partiel	Non disponible	
Procédé Breton 08/2004	Mécanique : séparation mécanique (floculation et tamisage)	Non disponible	Partiel	Immobilisation :	< 5 $\$\cdot m^{-3}$
				Opération :	< 5 $\$\cdot m^{-3}$
				Totaux[c] :	*5-10* $\$\cdot m^{-3}$
Procédé Maximiser 08/2004	Mécanique : séparation mécanique	Non disponible	Partiel	Immobilisation :	< 5 $\$\cdot m^{-3}$
				Opération :	< 5 $\$\cdot m^{-3}$
				Totaux[c] :	*5-10* $\$\cdot m^{-3}$

Lisitech 07/2006	Mécanique : séparation mécanique (décantation et floculation)	Ferme	Partiel (ou complet selon les options choisies)	Immobilisation : Opération : *Totaux*[c] *:*	10-15 $\$\cdot m^{-3}$ 5-10 $\$\cdot m^{-3}$ *15-20* $\$\cdot m^{-3}$
Compost Air [MD] 11/2000	Biologique : compostage	Non disponible	Non disponible	Immobilisation : Opération : *Totaux*[c] *:*	< 5 $\$\cdot m^{-3}$ 5-10 $\$\cdot m^{-3}$ *5-10* $\$\cdot m^{-3}$
Éco-Compost 09/2000	Biologique : compostage	Non disponible	Non disponible	Immobilisation : Opération : *Totaux*[c] *:*	< 5 $\$\cdot m^{-3}$ 10-15 $\$\cdot m^{-3}$ *10-15* $\$\cdot m^{-3}$
Marvel-Total NMS 09/2000	Biologique : compostage	Non disponible	Non disponible	Non disponible	
Biosor [MD] 11/2001	Mécanique : biofiltration	Non disponible	Complet (sur la fraction liquide)	Immobilisation : Opération : *Totaux*[c] *:*	5-10 $\$\cdot m^{-3}$ 5-10 $\$\cdot m^{-3}$ *10-15* $\$\cdot m^{-3}$

a Unité de référence : 14 600 m^3 lisier·an^{-1}; Exclus les revenus possibles de la vente des sous-produits.
b Unité de référence : 40 m^3 lisier·jr^{-1}; Durée de vie utilisée : 15 ans.
c Unité de référence : 20 m^3 lisier·jr^{-1}; Durée de vie utilisée : 15 ans.
d Unité de référence : 15 000 m^3 lisier·an^{-1}; Le calcul des coûts d'opération comprend le remplacement des membranes à tous les cinq ans.
e Unité de référence : 20 m^3 lisier·an^{-1}; Durée de vie utilisée : 15 ans.
f Unité de référence : 5 000 m^3 lisier·an^{-1}.
g Unité de référence : 2 740 m^3 lisier·an^{-1}.
h Unité de référence : 14 976 m^3 lisier·an^{-1} (environ 7 500 porcs place).
i Unité de référence : 14 600 m^3 lisier·an^{-1}.
j Unité de référence : 6 000 m^3 lisier·an^{-1}; Durée de vie utilisée : 10 ans ; Au-delà de 6 000 m^3 lisier·an^{-1} le coût de traitement diminue si on traite plus de lisier avec les équipements, jusqu'à concurrence de 18 000 m^3 lisier·an^{-1}.
k Unité de référence : 13 963 m^3 lisier·an^{-1}; Exclus les coûts du biofiltre.
l Unité de référence : 13 000 m^3 lisier·an^{-1}.
m Unité de référence : 14 600 m^3 lisier·an^{-1}.

1.6.7 Technologie de traitement à l'étude

La technologie LISOX utilise un mode de gestion solide-liquide. Elle est appliquée et commercialisée pour le lisier de porc à la ferme. Elle peut s'insérer dans un traitement centralisé si la ferme est située dans une région en surplus. Dans une chaîne classique de gestion du lisier de porc, voici où se situe schématiquement le traitement LISOX (Figure 1.2):

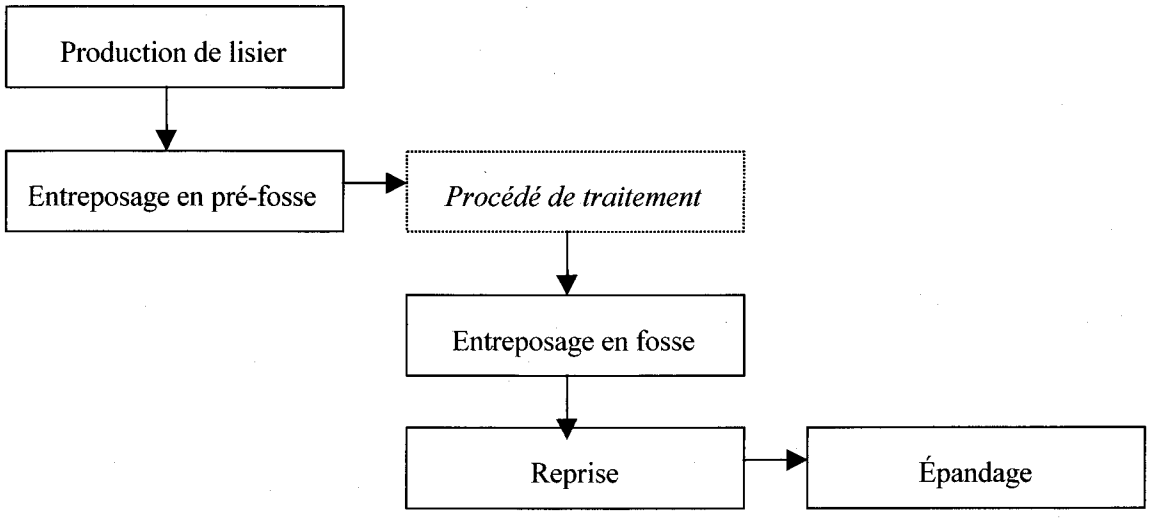

Figure 1.2 Position du procédé de traitement LISOX dans la chaîne de gestion du lisier

1.7 Technologie de traitement du lisier par flottation biologique

Il existe peu de données sur des technologies de séparation liquide-solide faisant appel à un procédé de flottation pour le traitement du lisier. 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 présentera 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 un second temps, il expose le fonctionnement et les étapes de la technologie LISOX actuellement en place sur les fermes pour le traitement du lisier de porc.

1.7.1 Flottation biologique

Cette section définit dans un premier temps la flottation et situe l'application de LISOX pour la séparation du lisier bovin. Ensuite, elle expose les concepts théoriques qui sous-tendent à la flottation.

1.7.1.1 Définitions et applicabilité au lisier de bovin

La flottation est un procédé de séparation solide-liquide ou liquide-liquide, qui est employée pour le traitement des eaux usées domestiques ou industrielles et pour l'épaississement des boues. Degrémont (1989) présente les trois types de flottation : la flottation naturelle, la flottation assistée et la flottation provoquée. Dans les trois cas, pour permettre la flottation de particules solides, il est nécessaire d'avoir une production de gaz, qui engendrera la formation d'attelage bulle-particule (section 1.7.1.2). Ces attelages vont alors remonter à la surface. Ce gaz est produit naturellement par les microorganismes du lisier mais peut également, dans le cas de la flottation provoquée, provenir d'un système d'aération, comme c'est le cas pour la flottation à air dissous (FAD ou DAF) (Degrémont, 1989). Dans le cas de Lisox, l'usage de polymère pour améliorer et augmenter les attelages bulle-particule révèle que cette technologie fait appel à une flottation biologique assistée. Les trois formes de flottation se différencient entre autres par la masse volumique des particules à flotter (Tableau 1.6).

Tableau 1.6 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 dite naturelle lorsque la masse volumique des particules est assez inférieure à celle du liquide pour que les particules flottent sans intervention. La flottation assistée fait appel à des moyens externes pour améliorer la flottation naturelle. Enfin, pour la flottation provoquée, la masse volumique des particules à flotter est artificiellement diminuée en formant des attelages particule-gaz moins denses que le liquide. La flottation à air dissous (FAD ou DAF) entre dans la catégorie "flottation provoquée" (Degrémont, 1989). En application industrielle, les trois types de flottation se recoupent.

Le lisier de vache laitière possède des caractéristiques permettant d'envisager un traitement par flottation biologique. En effet, en fosse pendant le stockage, il se sépare systématiquement en trois phases : une croûte composée de particules organiques allégées par les bulles de gaz issues des fermentations et de brins de paille ou de foin ; un dépôt plus ou moins important dans lequel se trouve la plus grande partie du phosphore et l'azote organique, et une phase liquide centrale ne contenant que les éléments solubles (ammonium et potassium) (Banton *et al.*, 1994).

Par contre, on remarque maintenant que chez les grandes entreprises, l'utilisation de sciure de bois comme litière au lieu de la paille empêche la formation d'une croûte superficielle (Barrington, 1997). On peut imaginer, donc, que les solides ne pourront pas s'accumuler en surface dans le cas de l'utilisation de sciure de bois, et que la séparation solide-liquide sera plus difficile à obtenir.

Comme une partie des constituants du lisier de bovin décantent, il est nécessaire de faire appel à la flottation provoquée pour une séparation optimale du lisier.

1.7.1.2 Théorie de la flottation provoquée

Selon Degrémont (1989), la flottation provoquée dépend de l'affinité de particules solides avec des bulles de gaz, qui vont former des attelages moins denses que le liquide. Ce phénomène triphasique (gaz-liquide-solide) dépend des caractères physico-chimiques des trois phases et en particulier de leurs interfaces. En général, une étape de floculation avant celle de la flottation provoquée permet de diminuer la densité des flocs qui ont piégé le gaz (Degrémont, 1989). La Figure 1.3 illustre un attelage floc-gaz.

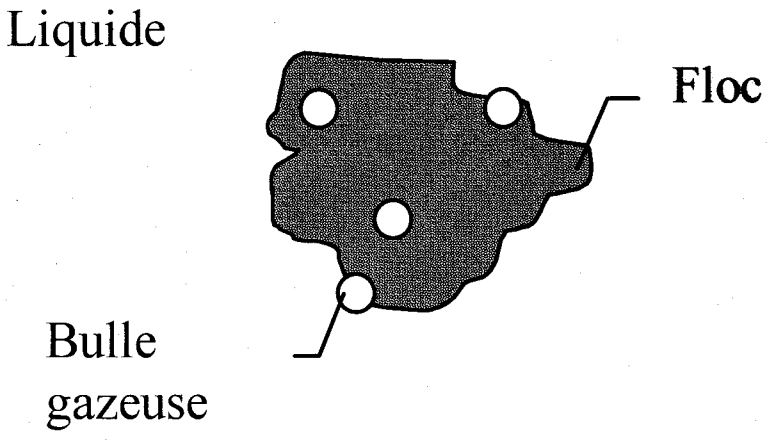

Figure 1.3 Schéma d'un attelage floc-bulle

Lors de la flottation d'un attelage floc-gaz, différentes forces entrent en jeu : des forces de gravité, de poussée et de traînée. Leur résultante induit une vitesse ascensionnelle à l'attelage (Degrémont, 1989). L'équation de Stokes, issue de l'analyse de ces forces[4], décrit la vitesse ascensionnelle d'un attelage floc-gaz (Degrémont, 1989).

---

[4] La démonstration de cette équation est présentée à l'annexe A

Équation 1.5 Vitesse ascensionnelle (V) d'un attelage floc-gaz

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

Où :

g : accélération gravitationnelle, $m \cdot s^{-2}$

η : viscosité dynamique, $N \cdot s \cdot m^{-2}$

ρ_l : masse volumique du liquide, $kg \cdot m^{-3}$

ρ_s : masse volumique de l'attelage floc-gaz, $kg \cdot m^{-3}$

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

Cette équation est valable[5] pour un régime hydraulique laminaire (non turbulent) et une particule sphérique (de type gaz dans l'eau).

Afin de simplifier la compréhension et de pouvoir appliquer la loi de Stokes, l'attelage floc-bulle est assimilé à une sphère. De façon globale, les performances de la flottation sont liées à l'importance de la différence entre les masses volumiques de l'eau et de l'attelage ($\rho_l - \rho_s$), et au diamètre de la sphère (d). La floculation va permettre entre autres d'augmenter la taille des flocs, donc la surface des particules. Ainsi, les bulles de gaz vont plus facilement s'accrocher aux flocs et ainsi majorer le diamètre des attelages floc-bulle. La vitesse ascensionnelle des attelages va augmenter à son tour, grâce à l'amplification de la différence $\rho_l - \rho_s$ (Degrémont, 1989). Par contre, une trop grande augmentation du diamètre de l'attelage floc-bulle entraîne la diminution de la surface spécifique (surface/volume ou surface/masse) de l'attelage, ce qui peut avoir pour conséquence de diminuer la différence de densité (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.

---

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

Pour les bulles de gaz, l'utilisation de microbulles est nécessaire. En effet, des bulles plus grosses requièrent un débit plus important, créant des courants turbulents perturbateurs. Plus la concentration en bulles est importante, plus la probabilité de formation d'un attelage floc-bulle augmente. La vitesse ascensionnelle des bulles doit être faible par rapport à la masse liquide dans laquelle sont les flocs en suspension, afin qu'elles puissent se fixer aux flocs sans les briser (Degrémont, 1989). Ceci implique que le diamètre des bulles de gaz doit être bien inférieur à celui des flocs (le diamètre étant lié à la vitesse ascensionnelle) (Degrémont, 1989).

1.7.1.3 Mécanismes de génération de bulles de gaz

Les microbulles peuvent être produites par des moyens physiques, chimiques ou électrolytiques. Le gaz peut également être produit biologiquement ; on appelle cela une flottation biologique. Ce type de flottation constitue le sujet de la présente étude. La flottation biologique exploite la production gazeuse (principalement le CO_2, le CH_4 et le H_2S) issue de l'activité des microorganismes essentiellement anaérobies ou anaérobies facultatifs présents dans l'effluent à traiter (Blais, 2006). La formation de bulle entraine la flottation des MES (Blais *et al.*, 2007) par attelage bulle-particule. Les principaux genres microbiens retrouvés dans le lisier de bovin sont indiqués à la section 1.2.3.

1.7.2 Coagulation-floculation

La présente section définit d'abord les phénomènes de coagulation et de floculation, qui font appel à l'utilisation de polymères. Lorsqu'un polymère est utilisé, nous parlons alors de flottation biologique assistée (comme dans le cas de Lisox). Les mécanismes physiques et chimiques entrant en jeu lors de la coagulation et de la floculation, la nature et les particularités des polymères synthétiques y sont abordés et des cas d'utilisation de polymères pour le lisier de porc.

1.7.2.1 Définitions et mécanismes

La coagulation est la déstabilisation des particules colloïdales en suspension pour permettre leur agrégation, tandis que la floculation est le phénomène permettant cette agrégation une fois les particules coagulées, c'est à dire leur augmentation de volume (Degrémont 1989).

Au départ, les particules colloïdales sont dites stables, et ne peuvent décanter naturellement. Deux forces régissent la stabilité des particules en suspension : la force d'attraction de Van der Waals liée à la structure et à la forme des colloïdes ainsi qu'à la nature du milieu, et la force de répulsion électrostatique liée aux charges de surface des colloïdes. Comme les colloïdes sont de petite taille, les forces de répulsion dépassent celles d'attraction. Différents mécanismes se succèdent pour expliquer la déstabilisation des particules colloïdales, une fois le coagulant ajouté : au départ, il se produit une absorption d'ions positifs du coagulant à la surface de la particule qui neutralise l'ensemble. Ensuite, des liaisons spécifiques se créent entre les ions ou les espèces à la surface de la particule. Par la suite, les colloïdes sont incorporés dans des précipités d'hydroxyde (Dégremont, 1989 ; Bolto et Gregory, 2007).

La floculation est une agglomération de particules en microflocs, puis en flocs de plus en plus volumineux et décantables (Dégremont, 1989). Les collisions entre les particules sont favorisées par des gradients de vitesse dans le liquide d'où la nécessité de l'agiter.

1.7.2.2 Nature et particularités des polymères synthétiques

Les polyacrylamides et leurs dérivés constituent la principale classe de polymères synthétiques. Ils sont mieux connus sous l'acronyme «PAM». Ils sont obtenus par polymérisation de l'acrylamide et d'autres monomères. Le poids moléculaire, une des caractéristiques des polymères, est proportionnel au nombre de monomères qui le composent. Selon leur poids, les polymères sont classés en trois types : faible, moyen et élevé (Bolto et Gregory, 2007) (Tableau 2.3).

La Figure 1.4 expose la formulation d'une molécule de polyacrylamide (Degrémont, 1989).

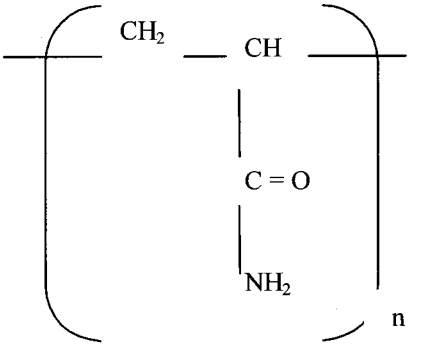

Figure 1.4 Schématisation d'une molécule de polyacrylamide

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. Les polymères anioniques sont obtenus par copolymérisation de l'acrylamide et de l'acide acrylique. Les polymères cationiques, eux, sont obtenus par copolymérisation de l'acrylamide avec un monomère cationique, généralement du méthacrylate de diméthylamino-éthyle (Madam) ou de l'acrylate de diméthylamino-éthyle (Adam) (Degrémont, 1989 ; Bolto et Gregory, 2007). La Figure 1.5 présente une schématisation des polymères cationiques.

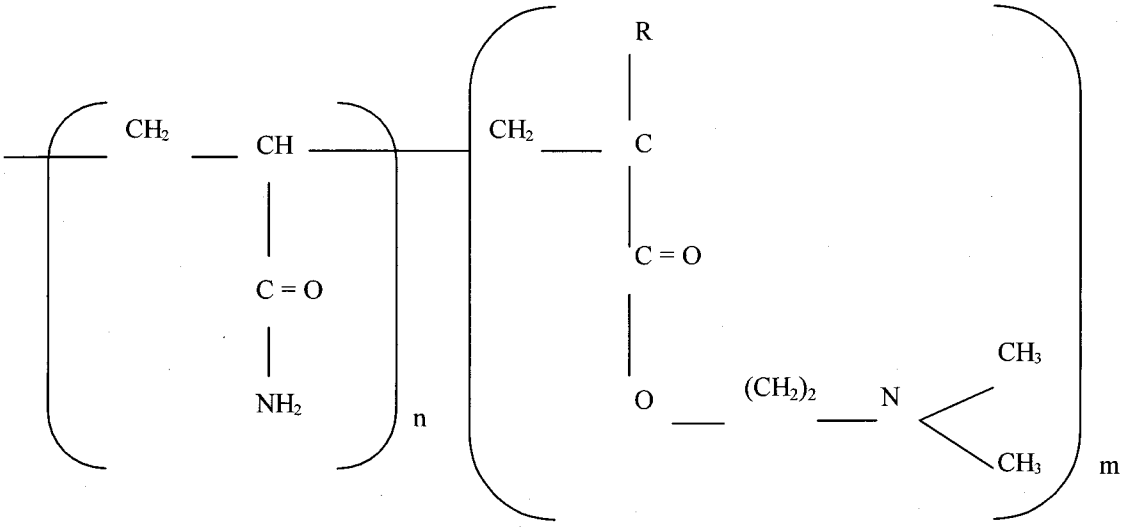

Figure 1.5 Schématisation d'une molécule de polymères cationiques

Noter que le radical R correspond à du CH_3 pour le Madam et à du H pour le Adam (Degrémont, 1989).

1.7.2.3 Application au lisier de bovin

Les particules de lisier sont chargées négativement en surface (Bélanger, 2002). Les polymères étaient donc de nature cationique. L'étude de Bélanger (2002) indique que les polymères de densité de charge élevée à très élevée et de poids moléculaire moyen ou élevé donnent les meilleurs résultats pour l'enlèvement des solides du lisier porcin. Il en va de même pour les particules organiques en suspension dans des eaux usées neutres ou alcalines. On peut donc, en présumant que la composition des lisiers de vache et de porc soit semblable, considérer que le lisier de vache réagira et formera également des flocs sous l'action de polymères cationiques.

1.7.3 Paramètres et fonctionnement actuel de la technologie LISOX

Les données présentées ici sont tirées du brevet américain de LISOX (Blais *et al.*, 2007). Étant le plus récent, il présente la dernière configuration de la technologie LISOX.

La technologie LISOX fait appel au principe de flottation biologique assistée. Elle est facilement applicable en mode batch, semi-continu ou continu. Les données correspondent à la configuration d'une unité de traitement à la ferme en mode continu. Les différentes phases de traitement sont les suivantes :

- ***Décantation primaire*** : dans un premier temps, le lisier est acheminé de la préfosse de stockage du lisier vers un décanteur primaire et est traité par décantation sans polymère pendant 0,25 à 2 h. Cette étape permet d'éliminer les matières facilement décantables en soutirant les solides décantés au fond du décanteur vers le réservoir à solides.
- ***Séparateur primaire:*** le liquide est ensuite envoyé sur un tamis d'une ouverture de maille de 3 mm, afin d'enlever les solides les plus gros avant la flottation.
- ***Flottation primaire*** : par la suite, on ajoute le polymère (floculant) à la concentration voulue au liquide sortant du décanteur, puis le liquide est envoyé dans le flottateur principal caractérisé par un temps de rétention hydraulique de 4 à 24 h. Le lisier produit des gaz (CO_2, H_2S, NH_3, etc.) en quantité suffisante pour permettre la flottation des matières en suspension qui remontent alors en surface. Les solides flottants sont ensuite récupérés par un racleur mécanique qui les achemine vers un réservoir. Les solides décantés sont recueillis par un racleur de fond situé dans le flottateur et passent ensuite par un système de vidange, avant d'être envoyés dans le réservoir à solides.
- ***Flottation secondaire*** : dans la troisième phase, le liquide subit une deuxième étape de flottation avec ajout de polymère dans la même cuve de flottation. Cette phase est caractérisée par un temps de rétention hydraulique se situant entre 0,5 et 4 h. Les solides récupérés par les racleurs sont acheminés dans le même réservoir que les solides recueillis au cours des deux premières phases.

- ***Égouttage des solides*** : Les solides issus de la flottation sont envoyés sur un tamis rotatif pour être essorés avant le stockage.

1.7.4 Rendements moyens de la technologie LISOX pour le lisier de porc

Pour une teneur initiale en solides totaux des boues entre 5 et 70 g L^{-1}, on obtient des rendements d'enlèvement se situant entre 70 et 90% pour les MES, la DCO et le phosphore total (P_{tot}). L'effluent du système présente un rapport $NH_4^+/P_t > 7$, ce qui rend son utilisation possible comme eau fertilisante (apport d'azote) allégée en phosphore dans les zones où les sols subissent des surcharges en phosphore.

Le mélange des solides sortant de chaque phase du procédé présente une siccité se situant entre 7 et 17% et une valeur moyenne d'environ 15 à 20%[6] de solides totaux. Il est donc possible d'exporter cette fraction solide.

1.7.5 Avantages de la technologie LISOX

Il est important de noter que les coûts d'exploitation de la filière de traitement peuvent être grandement diminués voir même éliminés par la mise en marché des solides issus du traitement (engrais naturel, etc.). Les installations sont simples à opérer et l'entretien est minimal puisque la filière de traitement cible les petites et moyennes porcheries. Une fois implanté, ce procédé peut être opéré directement par le personnel de la ferme. Un support technique est toutefois requis en cas de problème. La réutilisation des infrastructures existantes est aussi favorisée au maximum puisqu'elle peut permettre d'abaisser les coûts d'implantation du procédé.

---

[6] Dans le mémoire, 1% de ST = 1 g L-1, comme indiqué à la section 1.2.6

La technologie se différencie de toutes les technologies connues car elle est la seule qui utilise la flottation biologique naturelle sans apport d'aucun air pour faire flotter les solides conditionnés dans le procédé. De plus, l'agencement et la configuration des phases de la séparation des solides constituent un procédé novateur, efficace et économique. Elle permet donc avec un système combinant décantation et flottation biologique d'arriver à obtenir un solide compostable et un liquide suffisamment traité pour qu'il puisse servir d'eau fertilisante allégée en phosphore sur les terres agricoles en surplus de phosphore.

1.8 Critères d'évaluation des technologies

Les technologies de traitement du lisier sont généralement évaluées selon des critères environnementaux, agronomiques, techniques, économiques, sociaux et de santé. Les données fournies ici proviennent du Plan agroenvironnemental de la production porcine (Tableau 1.7).

Tableau 1.7 Critères d'évaluation des technologies émergentes

Critères d'évaluation				
Environnementaux	Agronomiques	Techniques	Économiques	Sociaux/santé
• Réduction des émissions de gaz à effet de serre • Réduction des émissions d'ammoniac • Augmentation du taux de demande des sous-produits • Réduction du transfert des polluants à l'environnement (globalement) • Réduction des impacts négatifs associés à la consistance du produit • Réduction des impacts négatifs associés au volume à gérer (énergie) • Diminution des risques d'accidents d'opération et de déversements • 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 renouvelable • Diversification des périodes possibles d'apport sur les cultures	• Contenu et valeur en matière organique du produit • Valeur fertilisante (qualité et quantité) des sous-produits • 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 • Réduction de la toxicité des produits • Élargissement de l'éventail des utilisations non conventionnelles	• Adaptabilité au climat 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 (niveau provincial) • Besoins en support technique et en formation (autonomie de gestion) • Disponibilité du support technique • Besoins d'entretien • Complexité • Adaptabilité à la variation de la charge à traiter • Adaptabilité à la croissance de l'entreprise	• Réduction des volumes à gérer • Sensibilité aux coûts de main d'œuvre • Sensibilité aux coûts des intrants • Potentiel d'accroissement de la charge animale • Adaptabilité à la taille de l'entreprise • Sensibilité à la distance de transport du produit • Marché potentiel pour les sous-produits • Coût de formation et de support technique • Durée de vie utile	• Réduction des nuisances olfactives aux bâtiments et à l'entreposage • Réduction des nuisances olfactives à l'épandage • Acceptabilité de la production • Santé et bien-être du travailleur agricole • Santé et bien-être de la population (risques chimiques et biologiques) • Santé et bien-être des animaux (risques chimiques et biologiques)

Afin d'évaluer le potentiel au laboratoire de la technologie LISOX pour le traitement du lisier de bovin, des paramètres quantifiables ont été déterminés. Il s'agit de deux indices (l'ICMF et l'ICQF), de l'enlèvement des MES et des ST de la fraction liquide, du rapport azote ammoniacal/phosphore total de la fraction liquide, de la teneur en azote totale, azote ammoniacal, phosphore total, des phosphates de la fraction liquide et de la siccité de la fraction solide.

1.8.1 Indice composé de la mesure de la flottation (ICMF) et Indice composé de la qualité de la flottation (ICQF)

Afin de synthétiser les résultats des essais, deux indices composés ont été créés lors d'une étude antérieure (Bélanger, 2002) : l'indice composé de la qualité de la flottation (ICQF) et l'indice composé de la mesure de la flottation (ICMF). Ces indices permettent de sélectionner les lisiers ayant le mieux flottés en tenant compte des paramètres essentiels à une bonne flottation.

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 1.6 Formule de l'indice composé de la qualité de la flottation

$$ICQF = F + Se + Su$$

Les coefficients de pondération sont contraints à 1. Le Tableau 1.8 présente la distribution et les valeurs de ces cotes.

Tableau 1.8 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	A	Aucune flottation (A)	Ne s'applique pas.
	$3 \leq ICQF \leq 4$	Faible (F)	
	$5 \leq ICQF \leq 7$	Moyen (M)	
	$8 \leq ICQF \leq 9$	Bon (B)	

Quant à l'indice ICMF, il correspond à la somme des valeurs des cotes attribuées pour le rapport $V_{S/L}$, la concentration en ST de la fraction solide et l'enlèvement des MES (E_{MES}) de la fraction liquide. L'enlèvement des MES a été préféré à l'enlèvement des ST puisque le procédé de séparation agit principalement sur les MES.

Équation 1.7 Formule de l'indice composé de la mesure de la flottation

$$ICMF = V_{S/L} + ST + E_{MES}$$

Les coefficients de pondération sont contraints à 1. De façon similaire, la distribution et les valeurs des cotes de l'indice ICMF sont exposées au Tableau 1.9.

Tableau 1.9 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
Rapport $V_{S/L}$	$V_{S/L} \leq 0$ ou$V_{S/L} > 1$	Faible (F)	1
	$0,5 < V_{S/L} \leq 1$	Moyen (M)	2
	$0 < V_{S/L} \leq 0,5$	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}	$0\% \leq E_{MES} < 50\%$	Faible (F)	1
	$50\% \leq E_{MES} < 85\%$	Moyen (M)	2
	$85\% \leq E_{MES} \leq 100\%$	Bon (B)	3
ICMF	A	Aucune flottation (A)	Ne s'applique pas.
	$3 \leq ICMF \leq 4$	Faible (F)	
	$5 \leq ICMF \leq 7$	Moyen (M)	
	$8 \leq ICMF \leq 9$	Bon (B)	

Les indices composés facilitent l'analyse des résultats des essais pour la qualité de la flottation. Cependant, ils ne prennent pas en compte les ions et autres éléments analysés, qui seront donc discutés par la suite.

1.8.2 Rapport azote ammoniacal/phosphore total et enlèvement du phosphore total de la fraction liquide

Ce rapport permet de relier la quantité de nutriments azotés et phosphorés rapidement disponibles pour les plantes. En effet, on considère que la totalité de l'azote ammoniacal et la quasi-totalité du phosphore sont assimilables directement par les plantes. Comme le rapport $N\text{-}NH_4/P_{tot}$ du lisier de bovin est inférieur à celui prélevé par les plantes, la proportion de phosphore dans le lisier est supérieure à la quantité assimilée par les végétaux. En général, l'épandage est réalisé en fonction des besoins en azote, ce qui crée un surplus de phosphore source de graves problèmes environnementaux. Il est donc important de réduire la quantité de phosphore dans les régions de

surplus en augmentant le rapport $N\text{-}NH_4/P_{tot}$. Le procédé LISOX utilisé avec du lisier de porc permettait d'obtenir un ratio égal ou supérieur à 7 (CPVQ, 1996). Par contre, comme la quantité d'azote du lisier de bovin est inférieure à celle du lisier de porc, on peut sans doute estimer que cette valeur ne sera pas atteinte pour les lisiers de vache laitière-génisse et de veau. Afin d'atteindre la valeur de 7 pour le rapport de pouvoir utiliser la fraction liquide sans risque pour l'environnement, la teneur en phosphore doit donc diminuer. L'enlèvement du phosphore (Annexe B) obtenu lors des essais en mode batch (315 litres) avec du lisier de porc était compris entre 31,5 et 85,9 % selon les tests effectués.

1.8.3 Enlèvement des matières en suspension (MES) et des solides totaux (ST) de la fraction liquide

Afin de pouvoir utiliser la fraction liquide comme eau fertilisante allégée en phosphore, celle-ci doit posséder des teneurs finales en MES inférieure à 3 g L^{-1} (Blais *et al.*, 2007). L'enlèvement des solides totaux étant lié à celui du phosphore particulaire, il est donc essentiel de pouvoir enlever un maximum de solides au cours du traitement (Annexe B).

1.8.4 Siccité de la fraction solide

La siccité de la fraction solide (Annexe B) 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 porcin (Bélanger, 2002). Cet objectif concerne un traitement à la ferme, avec le matériel adéquat, notamment l'égouttage des solides. Cette étape étant difficile à réaliser en laboratoire, la valeur pourra être revue à la baisse au cours de notre étude.

1.8.5 Concentration des formes solubles de l'azote ($N\text{-}NH_4$) et du phosphore ($P\text{-}PO_4$) de la fraction liquide

L'évaluation de la teneur globale en orthophosphates (notée $P\text{-}PO_4$) permet de déterminer quelle est la forme principale du phosphore dans le lisier, et quelle est la proportion de phosphore dissous. Les éléments sous formes solubles ($N\text{-}NH_4$ et $P\text{-}PO_4$) seront en effet les premiers assimilés par les plantes une fois l'épandage réalisé, car se sont les formes chimiques les plus disponibles pour les végétaux. Aucune valeur cible n'a été fixée pour ces données, car on souhaite connaître surtout sous quelles formes se présentent l'azote et le phosphore, et quelle sera leur évolution au cours des essais.

1.8.6 Concentration en azote total Kjeldahl (N-NTK) de la fraction liquide

Il est important de déterminer la teneur total en azote non oxydé dans la fraction liquide. En effet, l'azote ammoniacal sera le plus disponible pour les plantes.

1.8.7 Concentration des formes organiques de l'azote (N-org) et du phosphore (P-org) de la fraction liquide

L'azote étant facilement solubilisé dans l'eau, la quantité d'azote sous forme organique (N-org) doit être connue, car une fois épandu, cet azote peut migrer vers les eaux de surface ou souterraines et être minéralisé rapidement. Dans ce cas, il pourrait exister un risque pour l'environnement. La quantité d'azote organique est calculée comme suit :

Équation 1.8 Calcul de la concentration en N-org

$$\text{N-org} = \text{NTK} - \text{N-NH}_4$$

La teneur en phosphore organique (P-org) de la fraction liquide est obtenue ainsi :

Équation 1.9 Calcul de la concentration en P-org

$$\text{P-org} = P_{tot} - \text{P-PO}_4$$

Ceci permet de connaître la proportion de la forme organique du lisier, qui sera moins facilement assimilable par les plantes lors de l'épandage, par rapport aux P-PO_4. Il est donc intéressant de diminuer les quantités de P-org de la fraction liquide grâce au traitement.

1.9 Valorisation des sous-produits

1.9.1 Devenir des différentes fractions après traitement

Les sous-produits issus du traitement sont potentiellement valorisables. Pour le procédé LISOX, ces sous-produits sont les fractions liquide et solide.

La fraction solide, concentrée en nutriments et en matières organiques, peut être utilisée directement comme engrais organo-minéral dans les zones qui ne sont pas considérées en surplus de phosphore. Si la siccité voulue est atteinte, la fraction solide sera plus facilement transportable à un coût moins élevé, et l'exportation possible vers des zones moins concentrées. La fraction solide peut également être acheminée dans un centre de traitement centralisé. Enfin, il est possible de composter la fraction solide en y ajoutant des matières carbonées (sciures, copeaux de bois, etc.) (Blais et al., 2007).

La fraction liquide peut être valorisée directement à la ferme ou chez des producteurs receveurs. Si elle atteint les exigences recommandées, elle pourra être entièrement valorisée. Elle constitue ainsi une eau fertilisante allégée en phosphore adaptée aux besoins des cultures, en évitant de dépasser les limites de capacité du sol, puisqu'une partie importante du phosphore a été éliminé de la fraction

liquide, diminuant ainsi sa valeur fertilisante par rapport au lisier brut. De plus, la fraction liquide peut être recyclée comme eau de lavage. La fraction liquide peut être entreposé dans une fosse extérieure afin d'être utilisée au moment désiré. Cet effluent est aussi beaucoup moins odorant que le lisier brut et peut être épandu en utilisant des équipements conventionnels d'épandage (Blais *et al.*, 2007).

1.9.2 Spécificité des normes d'épandage pour les lisiers traités à l'aide de polymères

Les déjections épandues au champ sans traitement sont soumises aux règlements imposés dans le REA. Mais dans le cas de LISOX, comme les fractions finales contiennent des résidus de polymère, le lisier ne peut alors plus être considéré comme un résidu d'élevage, mais bien comme une matière résiduelle fertilisante (MRF) (Ministère de l'Environnement et de la Faune, 1998[7]), et doit respecter certaines normes du Guide sur la valorisation des matières résiduelles fertilisantes (Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP), 2004) afin de pouvoir être épandu. Chaque MRF est classée selon la teneur en contaminants chimiques (catégories C), en pathogènes (catégories P) et selon les caractéristiques d'odeurs (catégories O). C'est ce qu'on appelle la classification C-P-O. Il existe deux catégories C (C1 et C2 : MDDEP, 2004), deux catégories P (P1 et P2 : MDDEP, 2007) et quatre catégories O (O1, O2, O3 et Hors Catégorie : MDDEP, 2007) représentant différents niveaux de contamination (Annexe C). Un résidu qui ne satisfait pas aux exigences minimales de la classe C2-P2-O3 est considéré « hors catégorie ». Il ne doit pas être épandu lorsqu'on pratique l'agriculture et la sylviculture, sauf dans des cas exceptionnels, et à la condition d'appliquer des mesures de mitigation spécifiques (MDDEP, 2004). Cependant, même si les lisiers traités contenant du/des polymère(s) sont classés MRF, les agriculteurs n'ont, dans la pratique, pas de moyens autre que l'épandage pour éliminer le lisier à moindre coût. Pour l'instant, les vérifications effectuées afin de pouvoir épandre sont donc celles

---

[7] Les matières résiduelles fertilisantes (MRF) sont définies comme des matières ou objets périmés, rebutés ou autrement rejetés, dont l'emploi vise à entretenir ou à améliorer, séparément ou simultanément, la nutrition des végétaux, ainsi que les propriétés physiques et chimiques et l'activité biologique des sols (MEF, 1998).

présentées par le REA, car les opérations de traitement subies par les déjections animales (notamment LISOX) ne permettent pas toujours d'atteindre les critères définis dans la cadre du guide de valorisation (normes plus restrictives que celles du REA (Ministère de l'Environnement, 2003)), particulièrement en ce qui concerne les catégories P. Le REA, énonce notamment les directives à prendre concernant les élevages d'animaux et installations d'élevage de ces animaux, les ouvrages de stockage des déjections et leur épandage sur des sols utilisés pour la culture (Ministère de l'Environnement, 2003). Le REA prévoit donc que pour toutes les exploitations qui utilisent une gestion des déjections sous forme liquide ou dans le cas d'une gestion solide dont la production annuelle de phosphore serait supérieure à 1600 kg, les éleveurs ont l'obligation de mettre en place des structures d'entreposage étanches pour les fumiers et lisiers et l'épandage ne peut se faire qu'en conformité à un plan agroenvironnemental de fertilisation (PAEF), qui détermine, selon le type de gestion, la taille, la quantité de phosphore produite et le potentiel d'épandage de l'exploitation les mesures à prendre pour pouvoir épandre les fumiers et lisiers en respectant l'équilibre des sols en phosphore (lieu, calendrier et équipement d'épandage). Chaque exploitation agricole doit posséder les terres nécessaires pour l'épandage de ses fumiers ou prendre les moyens nécessaires pour y suppléer, soit modifier l'alimentation des animaux, assurer le traitement complet de ses surplus de fumier ou encore, réduire son cheptel (Ministère de l'Environnement, 2003).

Comme nous venons de l'expliquer, un lisier traité est considéré comme une MRF à cause de son contenu en polymère. Cependant, jusqu'à présent, bien que l'usage des polymères soit très répandu dans le traitement des eaux usées, peu d'études ont été menées pour déterminer l'impact sur l'environnement et la santé humaine des polymères synthétiques (Liber *et al.*, 2005 ; Mercier *et al.*, 2005). Il semble toutefois qu'ils ne présentent pas de risques importants pour la santé (Mercier *et al.*, 2005 ; Seybold, 1994 ; Smith *et al.*, 1996), étant donné leur nature organique et biodégradable (Barvenik, 1994). À des taux d'application dans les normes, les PAM n'ont pas d'effet négatif sur la croissance des plantes (Seybold, 1994). Des essais en laboratoire ont démontré que l'ajout de PAM aux nutriments pour la culture de tomates n'affectait pas leur croissance, bien qu'il y ait eu interaction entre le polymère et les différents nutriments, car leurs concentrations étaient significativement différentes du témoin (Seybold, 1994). Il est fait mention de l'utilisation des polymères cationiques dans divers secteurs comme l'alimentation animale ou les cosmétiques sans

danger pour la santé (Mercier *et al.*, 2005). Les polyacrylamides anioniques et neutres sont parfois même employés pour conditionner le sol, améliorer ses qualités de stabilité et de structure, car ils permettent notamment, en agglomérant les particules, de ralentir l'érosion et d'améliorer la rétention d'eau (Seybold, 1994 ; Sojka *et al.*, 1998). Les polymères cationiques étant plus toxiques que les polymères anioniques (Bolto et Gregory, 2007 ; Liber *et al.*, 2005), leur usage pour stabiliser le sol n'est pas recommandé car ils peuvent provoquer une toxicité sur les poissons (Goodrich *et al.*, 1991). Cette toxicité dépend fortement de la structure et du poids moléculaire du polymère (Bolto et Gregory, 2007), ainsi que de la présence de matière humique. En effet, celle-ci permet de réduire la toxicité envers les branchies puisque les PAM se fixent aux acides humiques (Goodrich *et al.*, 1991). Les polymères peuvent donc devenir toxiques pour les organes vitaux des êtres vivants dans le milieu s'ils ne sont pas adsorbés sur les solides. Les PAM épandus dans les champs se fixent rapidement et de façon irréversible aux particules du sol (Mercier *et al.*, 2005 ; Seybold, 1994). D'après une étude de l'autorité administrative des Pays-Bas (STOWA), les polyélectrolytes (polymères) utilisés dans le traitement des eaux usées sur l'environnement n'ont pas d'effet néfaste sur les écosystèmes (SNF, 2004). Or, les normes au Pays-Bas sont très strictes en matière de contraintes à l'épandage (Mercier *et al.*, 2005). De façon globale, aucun problème sérieux n'a été répertorié lorsque le contrôle de la qualité dans les usines de production des polyacrylamides est bien fait afin d'éviter la présence de monomère et que les PAM servent à floculer des lisiers et des boues d'épuration à des doses normalement utilisées (Mercier *et al.*, 2005). Dans ce contexte, en effet, l'emploi de polymères organiques pour le traitement de biosolides pour l'épandage ne présente pas de risques environnementaux démontrés (Mercier *et al.*, 2005). Les seuls cas de toxicité établis font suite à des études en laboratoire (Caulfield *et al.*, 2002) pour lesquelles les doses et les méthodes employées ne peuvent être comparables ou applicables aux pratiques actuelles de conditionnement des biosolides. Ces mêmes auteurs concluent qu'aucune étude n'a pu démontrer la formation de monomère lors de la dégradation au champ des polyacrylamides. Cependant, des études contradictoires (Smith *et al.*, 1996) indiquent une dégradation des polyacrylamides en acrylamides lorsque les conditions sont proches de celle de l'épandage. Lors de l'utilisation de polymères pour la déshydratation des boues ou pour le procédé LISOX actuel, ceux-ci se lient de façon très forte avec les solides et il n'est pratiquement plus disponible dans le milieu liquide donc pour les organismes aquatiques (Mercier *et al.*, 2005). De plus, différentes études menées lors

d'essais aux champs (Mercier *et al.*, 2005) ont démontré que les fractions solides et liquides issues du procédé LISOX avaient des effets bénéfiques lors de la fertilisation. Grâce aux conditions de pH des coproduits du lisier de porc issus du procédé (entre 6,5 et 8,5), le polymère s'hydrolyse rapidement ce qui a pour effet d'éliminer sa toxicité potentielle. De plus, comme mentionnés auparavant, si l'utilisation des polymères se fait de façon adéquate lors du conditionnement des biosolides il n'existe pas de risques démontrés (Mercier *et al.*, 2005). Smith et al. (1996) rapportent qu'une fois fixés aux particules de sol, les polyacrylamides sont dégradés en CO_2 et NH_3.

Même s'il est reconnu que les polyacrylamides ne sont pas toxiques à faibles concentrations pour les humains, les animaux et les plantes (Liber *et al.*, 2005 ; Rothwell, 1974 ; Seybold, 1994 ; Thomas, 1964), les monomères d'acrylamide, issus d'une polymérisation incomplète[8] sont reconnus comme étant neurotoxiques pour les humains (Abdelmagid et Tabatabai, 1982 ; Croll *et al.*, 1974, Seybold, 1994 ; Sheldon *et al.*, 1979 ; Smith *et al.*, 1996) et irritants pour la peau (Seybold, 1994 ; Thomas, 1964). Des cas de toxicité chez l'homme indiquent une augmentation de la sensibilité des doigts, un engourdissement des membres inférieurs et une faiblesse dans les mains et les pieds. Une exposition à long terme entraîne notamment la perte des sensations, la diminution des réflexes, l'atrophie des muscles (Seybold, 1994 ; Smith *et al.*, 1996). Chez les invertébrés aquatiques, les acrylamides provoquent une diminution de la diversité des espèces. Aucune mort de poisson n'a été observée (Seybold, 1994). Les tests sur des animaux ont démontré qu'une exposition aigue affecte le système nerveux central, tandis qu'une exposition chronique peut également affecter le système nerveux périphérique (Seybold, 1994 ; Sheldon *et al.*, 1979). Les acrylamides sont très solubles dans l'eau (2 kg L^{-1}) et ont une capacité d'adsorption sur les boues, les sédiments ou les résines quasi inexistante (Seybold, 1994 ; Smith *et al.*, 1996). Ces propriétés en font un contaminant potentiel de l'eau des nappes phréatiques (Seybold, 1994 ; Sheldon *et al.*, 1979). Selon les expériences menées par Brown *et al.* (1980) et Sheldon *et al.* (1979), les acrylamides sont biodégradables (en 100 à 700 heures) dans les eaux de surface et celles polluées. Dans l'eau du robinet et l'eau stérilisée, aucune dégradation n'avait lieu avant 80 jours (Brown *et al.*, 1980). Ils sont également biodégradables et ne s'accumulent pas dans le sol. Les acrylamides sont hydrolysés

---

[8] Les monomères d'acrylamide représentent une quantité variant de 0,05% à 5,5% du produit final (Croll *et al.*, 1974 ; Sheldon *et al.*, 1979).

dans le sol et produisent de l'ammonium qui peut éventuellement être oxydé en nitrite ou en nitrate sous conditions aérobies (Seybold, 1994 ; Smith *et al.*, 1996) et du CO_2 (Smith *et al.*, 1996).

1.10 But de la recherche

L'industrie bovine au Canada représente un secteur économique important. Pour pouvoir continuer à se développer conformément aux futures réglementations et dans un souci de gestion durable, il est essentiel de trouver des solutions au problème de rejets excédentaires de lisier. Les technologies de traitement individuel ou centralisé permettraient d'apporter un élément de réponse à cette gestion des lisiers.

Dans ce contexte, le but de la recherche est d'évaluer, à l'échelle du laboratoire, le potentiel de la technologie LISOX (actuellement en place et fonctionnelle pour le traitement du lisier porcin), pour le traitement du lisier bovin par flottation biologique.

1.11 Objectifs spécifiques de recherche

1. Évaluer le potentiel de la technologie LISOX sur des lisiers provenant de différents élevages bovins (veaux, vaches laitières et vaches laitières-génisses) à l'aide de différents polymères permettant la flottation biologique;

2. Optimiser les principaux paramètres opératoires suivants :

    - Déterminer quel polymère devra être utilisé ainsi que sa concentration afin de sélectionner le ou les plus adapté (-s);
    - Évaluer l'effet du tamisage et de la teneur initiale en solides totaux sur la flottation afin d'ajuster ces derniers avant la flottation;
    - Étudier l'effet de la température sur la flottation pour déterminer celle conduisant à une flottation satisfaisante;

- Déterminer la capacité de flottation du lisier bovin selon sa maturité;
- Évaluer le temps nécessaire à la flottation.

1.12 Démarche expérimentale

La démarche expérimentale menant à la concrétisation des objectifs spécifiques se résume ainsi :

1.12.1 Pré-essais

Le premier essai déterminera si le lisier bovin échantillonné présente un potentiel intéressant pour poursuivre l'étude. Afin d'arriver à ce premier objectif, des tests préliminaires en béchers sont effectués, avec six polymères aux caractéristiques différentes. Un ou deux polymères, selon la qualité de la flottation sont sélectionnés (ICQF).

1.12.2 Essais d'optimisation

- Les polymères sélectionnés sont ensuite testés à différentes concentrations (solution mère de polymère à 1 g et 5 g de polymère sous forme solide par litre d'eau). Un témoin sans polymère sera également testé. Ce dernier représente la flottation naturelle non assistée, c'est-à-dire sans polymère. Pour cette première série d'essais, la concentration de solides totaux (ST) du lisier sera ajustée à une teneur représentative de conditions normales d'opération (25 à 40 g ST L^{-1}). Ces essais seront effectués à température ambiante avec du lisier le plus frais possible. Aucun tamisage ne sera effectué sur les lisiers lors de cette première série d'expérimentations. Cet essai permettra d'établir quel polymère fonctionne le mieux, et pour quelle concentration.
- La deuxième série d'essais portera sur l'étude de l'effet du tamisage et des solides totaux sur l'efficacité de la flottation. Les lisiers seront donc tamisés sur des tamis de différentes ouvertures de maille (1 et/ou 2 et 3 mm). Ces fractions

seront ajustées à différentes teneurs en solides totaux (20, 40 et 50 g ST L^{-1}) et subiront des tests à température ambiante dans les conditions (type et concentration de polymère) définies précédemment. Des témoins non tamisés seront également testés pour chaque teneur en solides totaux.

- La troisième série d'essais traitera de l'effet de la température sur les lisiers, lesquels seront ajustés à une teneur en solides totaux représentative de conditions normales, puis conditionnés dans les conditions optimales définies lors des étapes précédentes. Les lisiers seront ensuite placés, en duplicata, sous différentes conditions de température (4, 10, 14, 18 et 22°C) pour les tests de flottation. Un témoin sans polymère (flottation naturelle) sera également testé à chaque température.
- La quatrième série d'essais portera sur l'effet du vieillissement des lisiers. Pour cela, un bidon de lisier conservé à 4°C sera stocké à température ambiante. Par la suite, des prélèvements seront réalisés aux différents vieillissements (7, 14, 21 et 28 jours) pour des essais de flottation. Le lisier sera, comme précédemment, ajusté à une teneur en solides représentative de conditions normales, puis conditionné de façon optimale. Cet essai se fera en duplicata avec en complément un essai de flottation naturelle non assistée (témoin) pour chaque vieillissement.
- Finalement, la cinquième série d'essais permettra de connaître le temps nécessaire à l'accomplissement de la flottation. Cinq cônes de décantation sont prévus pour chaque temps de flottation (0, 12, 24, 36 et 48 h). Un essai d'observation sans polymère (flottation naturelle) sera ajouté.

2. DÉMARCHE MÉTHODOLOGIQUE

2.1 Échantillonnage des lisiers

Cette section précise les conditions d'échantillonnage des lisiers (dates, lieux, taille de l'exploitation, etc.). Afin de simplifier la notation, des codes ont été attribués à chaque lisier brut (Tableau 2.1).

Tableau 2.1 Types et provenance des lisiers utilisés dans cette étude

Codes	Lisiers
A	Veau de Saint Charles de Bellechasse
B	Vache-génisse mélangé de Saint Henri de Lévis
C	Vache-génisse mélangé de Saint Roch des Aulnaies (échantillonnage 1)
D	Vache-génisse mélangé de Saint Roch des Aulnaies (échantillonnage 2)
E	Vache-génisse mélangé de Saint Denis

Des précisions sur la composition moyenne des lisiers de veau et de vache-génisse pour différents caractères physiques et chimiques sont indiquées à l'Annexe D.

2.1.1 Lisier de veau (A)

Le lisier de veau échantillonné le 03 mai 2006 provient de la ferme de Monsieur Bourgault, dans la municipalité de Saint Charles de Bellechasse. L'exploitation est composée de 285 têtes de bétail, uniquement des veaux de lait. Ces derniers sont reçus à l'âge d'une semaine pour être engraissés, puis sont expédiés après environ 4 mois. Il s'agit donc d'un lisier de type engraissement. La production annuelle de lisier est d'environ 830 m^3 et celui-ci n'est pas traité. Le lisier est directement rejeté dans des dalots situés dans les bâtiments d'élevage et se déverse par gravité dans une pré-fosse d'environ 1 m^3. Quand celle-ci est pleine, le lisier accumulé est envoyé vers une fosse.

Il est ensuite épandu sur les champs vers avril/mai. La stabulation est de type entravée (les veaux sont dans des loges) sans usage de litière.

L'échantillonnage du lisier a été effectué dans la pré-fosse. La pré-fosse a un taux de renouvellement du lisier assez élevé avec moins de cinq jours d'entreposage. Lors de l'échantillonnage, le lisier a été agité sommairement à l'aide d'une longue tige métallique. Par la suite, le lisier a été versé dans des réservoirs en polypropylène de 25 L de capacité, lesquels ont été entreposés à 4°C pour la durée des tests. Un seul échantillonnage d'un volume de 160 L a été effectué pour ce lisier.

Puisqu'il s'agit de lisier de veau de lait, sa composition et sa texture sont différentes de celles habituellement rencontrées dans un élevage bovin. Dans ce cas, la seule alimentation des veaux est constituée de lait en poudre dilué avec de l'eau à une température de 40-42°C. Cette alimentation produit du lisier beaucoup plus liquide et à plus faible teneur en solides totaux par rapport au lisier de porc étudié auparavant par Bélanger (2002).

2.1.2 Lisier de vache laitière-génisse (B)

Ce lisier de vache laitière-génisse a été échantillonné le 19 août 2006 à la ferme de Monsieur L'Heureux située dans la municipalité de Saint Henri de Lévis. L'exploitation est composée de 1 000 têtes de bétail, soit 600 vaches et 400 génisses. L'élevage est basé sur la production laitière et fonctionne selon un mode de stabulation libre sur litière de paille de céréale hachée. La quantité de paille employée est très faible, en moyenne 1 kg animal^{-1} semaine^{-1}. La production annuelle de lisier est d'environ 22 000 m^3 et celui-ci est non traité. Il est acheminé vers des dalots situés dans les bâtiments d'élevage, puis, à l'aide de racleurs, vers les différentes fosses remplies au fur et à mesure. Une petite fosse est consacrée uniquement au lisier de vache, tandis que trois grosses fosses reçoivent du lisier mélangé (vache-génisse). Il est ensuite épandu sur les champs. L'épandage commence en mai et se poursuit jusqu'au mois d'août.

Du lisier de vache-génisse brassé et homogène a été prélevé au centre de la fosse. Ce lisier possède une teneur plus élevée en solides totaux par rapport au lisier de veau.

2.1.3 Lisier de vache laitière-génisse (C)

Ce lisier provient de l'exploitation de Monsieur Hudon, dans la municipalité de Saint Roch des Aulnaies. L'élevage est composé de 185 vaches laitières et 165 génisses. La quantité de lisier produite par année est de 8430 m^3. Le lisier est acheminé vers une pré-fosse d'une capacité d'environ 34 m^3 par des racleurs au sol. Une fois celle-ci remplie, il est envoyé vers la fosse extérieure. Le type de stabulation est libre pour les vaches. L'agriculteur emploie de la sciure de bois comme litière à raison de 1 kg $animal^{-1}$ $jour^{-1}$ (ce qui pourrait empêcher une bonne flottation). L'échantillonnage a eu lieu le 8 novembre 2006 dans la fosse extérieure servant au stockage du lisier.

2.1.4 Lisier de vache laitière-génisse (D)

Ce lisier provient de la même exploitation que le lisier de vache-génisse (C). Cependant, il n'a pas été échantillonné dans la fosse de stockage comme précédemment, mais dans la pré-fosse. Afin d'obtenir un lisier frais et homogène, un second échantillonnage a été effectué le 27 novembre 2006 dans la pré-fosse vidée la veille.

2.1.5 Lisier de vache laitière-génisse (E)

Ce lisier a été échantillonné sur l'exploitation de Monsieur Garon, située dans la municipalité de Saint Denis. Il s'agit d'une exploitation de petite taille avec 32 vaches et 25 génisses. La quantité de lisier produite est de 180 m^3 an^{-1}. Le lisier est acheminé par des racleurs vers les dalots, puis dans une pré-fosse d'une capacité d'environ 49 m^3. Une fois celle-ci remplie, il est envoyé vers la fosse extérieure, qui fait environ 2000 m^3. Le type de stabulation est libre pour les vaches et entravée pour les génisses. La litière est constituée de paille de céréale, à environ 1 kg $animal^{-1}$ $jour^{-1}$. L'échantillonnage a eu lieu le 20 février 2007 dans la pré-fosse.

2.2 Description des essais

Cette section décrit les essais effectués au laboratoire. Le code et la description de chaque essai sont présentés au Tableau 2.2.

Tableau 2.2 Description et codes des essais réalisés au cours de la recherche

Codes	Description des essais
POL-1	Pré-tests pour le choix du ou des polymères
POL-2	Tests de polymères à 1 g L^{-1}
POL-3	Tests de polymères à 5 g L^{-1}
TAM	Tests de tamisage et de dilution du lisier
TEM	Tests de temperature
AGE	Tests de vieillissement du lisier
FLO	Tests de durée de flottation
CT-1	Tests de conditionnement-tamisage 1
CT-2	Tests de conditionnement-tamisage 2
CT-3	Tests de conditionnement-tamisage 3

Les lisiers bruts de chaque test peuvent avoir des caractéristiques différentes, être dilués, tamisés, etc. Ainsi, afin de différencier les différents tamisages initiaux et les dilutions appliqués aux lisiers bruts lors des essais de tamisage TAM, les codes suivants ont été ajoutés au code du lisier :

- **A1** ; **A2** ; **A3** ; **A4** : Lisier A à 4 concentrations initiales en ST différentes;
- **B1** ; **B2** : Lisier B à 2 concentrations initiales en ST différentes;
- **D1** ; **D2** : Lisier D à 2 concentrations initiales en ST différentes;
- **E1** ; **E2** ; **E3** : Lisier E à 3 concentrations initiales en ST différentes;
- **NT** : Aucun tamisage initial du lisier brut;
- **T1** : Tamisage initial du lisier brut à 1 mm;
- **T2** : Tamisage initial du lisier brut à 2 mm;

- **T3** : Tamisage initial du lisier brut à 3 mm;
- **T8** : Tamisage initial du lisier brut à 8 mm.

Par exemple, pour le test A-TAM (essai de tamisage et de dilution du lisier A), le lisier A1-NT correspond à la teneur "1" en ST du lisier A, non tamisé. Les lisiers A1-T2 et A1-T3 ont la même teneur initiale en ST, mais ont été tamisés avant l'essai respectivement à 2 et 3 mm.

2.2.1 Tests de polymères (POL)

Les polymères synthétiques employés pour les essais sont classés en trois groupes : anioniques, cationiques et non-ioniques. Les polymères utilisés proviennent de *Ciba Spécialités Chimiques Canada inc.* (Trois-Rivières, QC, Canada) et sont présentés au Tableau 2.3. Il s'agit toujours de PAM. Nous utiliserons les anciens noms pour les identifier. Ces polymères ont été fournis sous forme cristalline et doivent être conservés dans un endroit frais et sec. Pour la réalisation des essais, les polymères ont été préparés la veille des essais par dissolution dans de l'eau distillée à une concentration de 1 g L^{-1} ou de 5 g L^{-1} avec une agitation (environ 12 h) sur une plaque avec barre magnétique.

Tableau 2.3 Description des polymères utilisés dans cette étude

Famille	Ancien nom	Nouveau nom	Poids moléculaire*	Densité de charge*
Cationique	Zetag 7654	Zetag 8165	VH	M
	Zetag 7689	Zetag 8180	H	H
	Zetag 7557	Zetag 7557	M	H
Anionique	Percol 342	Magnafloc 342	VH	L
	Percol E-10	Magnafloc 10	M	L
	Percol 336	Magnafloc 336	M	L
Neutre	Percol 765	Zetag 7565	VH	L

* VH (très haut), H (haut), M (moyen), L (bas).

2.2.1.1 Essais POL-1

Ce test est considéré comme un pré-essai, ceci afin de déterminer le polymère le plus efficace pour le traitement du lisier considéré. Après avoir préparé les solutions de polymère, un volume de 200 mL de lisier brut fut versé dans un bécher de 500 mL. Ensuite, on a ajouté 10 mL de polymère 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 de la qualité des flocs, de la séparation et du surnageant ont été effectuées (Tableau 2.4). Après une heure, la manœuvre a été répétée par ajout supplémentaire de 10 mL de polymère, soit un total cumulé de 20 mL, ce qui équivaut à une dose (volume/volume) de 9% v v^{-1}[9]. Aucun témoin n'est testé pour l'essai B-POL-1, car il ne s'agit que de sélectionner un polymère, et non d'étudier l'effet de l'apport d'un agent floculant fait à la flottation.

Tableau 2.4 Grille d'évaluation de la qualité des flocs, de la séparation et du surnageant (Bélanger, 2002)

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

[9] Rappel : Un exemple du calcul de% v v^{-1} de polymère est montré : 20 mL de solution de polymère / (20 mL de solution de polymère + 200 mL d'eau) = 9% v v^{-1}.

2.2.1.2 Essais POL-2

Ce test a été réalisé avec du lisier brut non traité uniquement dilué si nécessaire. Il s'agit de déterminer le dosage optimal du ou des polymères préselectionnés lors des essais POL-1. Les solutions de polymère étaient préparées selon la procédure décrite antérieurement à une concentration de 1 g L^{-1}, celle utilisée lors des précédentes recherches (Bélanger, 2002 ; Blais *et al.*, 2007). A cette concentration, la préparation du polymère est plus simple, car la dissolution se fait mieux dans un volume plus grand. Cet essai a été réalisé en cônes Imhoff jaugés à 1 L. Les concentrations de polymère testées étaient de 5, 9, 13, 17 et 20 % v v^{-1}. Un essai sans polymère est également testé. Ce témoin a l'avantage de représenter la flottation naturelle, non assistée par le polymère. Ainsi, il est possible d'observer et d'analyser l'intérêt d'un ajout de polymère pour la réussite de la flottation. Les caractéristiques des flocs, de la séparation et du surnageant ont été notées, ainsi que les volumes de solide et de liquide. Ces informations ont servi au calcul de l'indice composé de la qualité de la flottation (ICQF), qui sera présenté ultérieurement. L'échantillonnage a été réalisé après 18 à 68 h d'expérimentation selon le type de lisier, pour l'analyse de la teneur en solides totaux (ST), en matières en suspension (MES), en ions ammonium ($N\text{-}NH_4$), en azote Kjeldahl (N-NTK), ainsi qu'en phosphore soluble ($P\text{-}PO_4$) et total (P_{tot}). De plus, des échantillons des fractions solides flottées ou décantées ont été prélevés afin de déterminer leur teneur en ST (Annexe B).

2.2.1.3 Essais POL-3

Ce test visait à étudier l'efficacité du ou des polymères retenus, mais à une concentration de 5 g L^{-1}. En effet, bien qu'il soit plus aisé de préparer et d'utiliser une solution à 1 g L^{-1}, la technologie actuelle LISOX utilise une solution à 5 g L^{-1}, ce qui permet ainsi une économie importante d'eau de dilution, lors de la préparation du polymère. Les pourcentages de polymère retenus étaient 1 et 5% v v^{-1} pour le lisier A et 2 et 4% v v^{-1} pour la suite. Ce changement au cours de la recherche est dû aux résultats obtenus suite aux essais avec le lisier A, et sera donc justifié dans la section Résultats

et Discussion. Là encore, l'effet de la flottation naturelle est observé par le biais d'un témoin sans polymère.

Ces essais à 5 g L^{-1} permettent également d'observer si le fait de diminuer le volume de polymère en contact avec le lisier va influencer la qualité de la flottation, puisque les concentrations finales suivantes sont identiques :

- 1% v v^{-1} de polymère à 5 g L^{-1} (essais POL-3) =
  5% v v^{-1} de polymère à 1 g L^{-1} (essais POL-2) = 0,05 g L^{-1}
- 2% v v^{-1} de polymère à 5 g L^{-1} (essais POL-3) =
  10% v v^{-1} de polymère à 1 g L^{-1} (essais POL-2) = 0,10 g L^{-1}
- 4% v v^{-1} de polymère à 5 g L^{-1} (essais POL-3) =
  20% v v^{-1} de polymère à 1 g L^{-1} (essais POL-2) = 0,20 g L^{-1}

En comparant les essais POL-2 et POL-3, nous pourrons ainsi observer l'effet du volume de polymère et de la dilution par ce dernier sur la flottation. L'échantillonnage ainsi que les analyses effectuées étaient similaires au test POL-2.

2.2.2 Tests de tamisage et de dilution du lisier (TAM)

Une fois le type et le dosage du polymère arrêtés, on a étudié l'impact de la granulométrie sur la séparation du lisier. Bien que le but premier du test TAM soit l'effet de la taille des particules sur le processus de flottation, le tamisage entraînant indirectement une dilution du lisier, les effets de ce phénomène ont pu être également analysés. Les expériences ont été réalisées dans des cônes Imhoff. Les dilutions à l'étude variaient selon le type de lisier et ont été préparées avec de l'eau déminéralisée. Le lisier a été préalablement tamisé à une ouverture de pores comprise entre 1 et 8 mm. L'échantillonnage a été effectué selon la procédure présentée aux sections précédentes.

2.2.3 Tests de température (TEM)

L'effet de la température sur la flottation du lisier a aussi été étudié en cônes Imhoff. Les températures testées étaient de 4, 10, 14, 18 et 22°C. De plus, pour chaque température, la flottation biologique naturelle est testée à l'aide d'un témoin sans polymère. L'échantillonnage a été effectué selon la technique décrite précédemment.

2.2.4 Tests de vieillissement du lisier (AGE)

Afin d'étudier l'effet du vieillissement du lisier sur la séparation par flottation, celui-ci a été maintenu à température ambiante ($22 \pm 2^{o}C$) (et non à 4°C, comme pour les autres tests), et des tests ont été entrepris aux temps suivants : 7, 14, 21 et 28 jours. Pour chaque âge, un essai sans polymère (flottation naturelle) est testé. Les échantillons ont été prélevés comme précédemment.

2.2.5 Tests de durée de flottation (FLO)

Des tests de séparation du lisier ont également été réalisés avec des temps différents de flottation. Les observations ainsi que l'échantillonnage ont été effectués selon la procédure décrite précédemment. La flottation biologique naturelle est observée à l'aide d'un témoin sans polymère qui est échantillonné à la fin du temps de l'essai le plus long.

2.2.6 Tests de conditionnement/tamisage (CT)

Ces essais ont été réalisés avec le lisier de vache-génisse (E) uniquement, suite aux résultats peu concluants de flottation pour les lisiers de vache-génisse. Comme le lisier semblait plutôt décanter, particulièrement pendant le début des essais (48 h), on a décidé d'évaluer le potentiel d'un conditionnement/tamisage, afin d'élaborer une autre technique de séparation solide/liquide. Pour ces

tests, aucun indice ICMF/ICQF n'a été calculé, puisqu'il s'agissait d'essais de décantation et non de flottation. Cependant, les analyses réalisées étaient identiques aux tests de flottation.

2.2.6.1 Tests de tamisage du lisier pour différentes teneurs en ST (E-CT-1)

Le choix du polymère a été réalisé en évaluant la qualité des flocs obtenus lors du mélange lisier/polymère. Un pré-essai POL-1 ainsi que des essais POL-2 ont été réalisés afin de sélectionner le polymère le plus performant ainsi que sa concentration. Une fois le polymère et sa concentration sélectionnés, les effets du tamisage et de la dilution sur le lisier ont été évalués. Le lisier brut a donc été tamisé à 8 et 3 mm, et dilué, pour les deux grosseurs de tamis, à 20, 30 et 40 g ST L^{-1}. Chaque concentration a également été testée sans tamisage. La durée du test était de 12 h de contact polymère/lisier.

Les fractions finales de lisier ayant donné les résultats les plus concluants pour la décantation ont été tamisées à 3 mm puis 1 mm de grosseur de maille, afin de savoir s'il sera nécessaire de tamiser pour améliorer les résultats. Les fractions liquides ainsi que les fractions solides ont été échantillonnées pour chaque tamisage, à des fins d'analyses. La concentration en solides totaux et le tamisage les plus adaptés ont été sélectionnés.

2.2.6.2 Nouveaux tests de polymères (E-CT-2)

Ces essais avaient pour but de déterminer, une fois le polymère et le tamisage choisis, si la concentration en polymère initiale n'était pas trop élevée, et s'il était possible de réduire les coûts en diminuant cette teneur. Les concentrations testées étaient 10, 13 et 17% v v^{-1} de polymère à 1 g L^{-1}. Le polymère et le lisier étaient en contact pendant 1 h, puis le lisier a été tamisé à 3 mm (choix faisant suite aux résultats obtenus) et, finalement, mis à décanter pendant 1 h.

2.2.6.3 Tests d'enlèvement des particules fines de la fraction liquide (E-CT-3)

Suite aux résultats de l'essai E-CT-2, il était nécessaire d'identifier une méthode pour diminuer la teneur en particules fines dans la fraction liquide finale, afin de diminuer la teneur en P_{tot}. Pour cela, le polymère sélectionné a été testé à des concentrations plus élevées : 15, 20, 25 et 30% v v^{-1} à une concentration de départ de la solution de polymère de 1 g L^{-1}. Une partie du lisier initial était non diluée, et l'autre a été tamisée (donc diluée) à 3 mm. Le polymère et le lisier étaient mis en contact pendant 1 h. Ensuite, le lisier était de nouveau tamisé à 3 mm (choix réalisé suite aux essais E-CT-1).

2.3 Méthodes analytiques

Cette section énonce les méthodes employées et les appareils utilisés pour compléter les diverses analyses sur les échantillons de lisier. Les analyses ont été faites en triplicata (exception faite de N-NTK) et tous les coefficients de variations étaient inférieurs à 10%.

Les mesures de pH et de POR ont été réalisées à l'aide d'un pH-mètre *Accumet Research* modèle *AR 25 Dual Channel pH/Ion meter* de *Fisher Scientific* (Nepean, ON, Canada). Cet appareil est muni d'une électrode de pH Ag/AgCl de marque *Cole Parmer* (*Cole Parmer Instrument*, Anjou, QC, Canada) et d'une électrode de POR (référence Ag/AgCl) de marque *Cole Parmer*. L'appareil a été étalonné avant chaque utilisation par l'emploi de solutions d'étalonnage de marque *VWR International* (Mississauga, ON, Canada) à des valeurs de pH situées entre 4 et 10.

Les mesures de solides totaux (ST) et de matières en suspension (MES) ont été effectuées conformément aux méthodes standardisées de l'APHA (1999). Toutefois, pour les échantillons trop concentrés, des dilutions ont été effectuées. De plus comme le lisier de veau brut était très difficile à filtrer, la teneur en MES a été évaluée comme expliqué plus bas.

Pour simplifier la compréhension, quelques notations sont présentées au Tableau 2.5. De plus, l'Annexe B présente les méthodes de calculs de ces propriétés.

Tableau 2.5 Notations et descriptions de matières solides du lisier (Blais, 2006)

Matières	Descriptions	Méthodologie au laboratoire
STB (Solides Totaux lisier Brut)	Ensemble des matières en suspension et des sels dissouts du lisier brut	Évaporation d'un volume connu de lisier à 105°C pendant 8 h
STF (Solides Totaux fraction liquide Finale)	Ensemble des matières en suspension et des sels dissouts de la fraction liquide finale du lisier	
MESB (Matières en Suspension lisier Brut)	Matière solides flottant à la surface ou en suspension dans la masse de liquide du lisier brut	Filtration sur une membrane de 1,5 µm et séchage à 105°C pendant 8 h
MESF (Matières en Suspension fraction liquide Finale)	Matière solides flottant à la surface ou en suspension dans la masse de liquide de la fraction liquide finale du lisier	
SDB (Solides Dissous lisier Brut)	Quantité de matières dissoutes et colloïdales contenue dans le lisier brut	SD = ST – MES
SDF (Solides Dissous fraction liquide Finale)	Quantité de matières dissoutes et colloïdales contenue dans la fraction liquide finale du lisier	

Par la suite, les équations suivantes ont permis d'obtenir le taux de MES du lisier de veau brut :

Équation 2.1 Calcul de la concentration en MES

$$\mathbf{MES = ST - SD}$$

Si on considère que la teneur en solides dissous (SD) varie peu entre le lisier brut et le liquide final séparé, on peut alors obtenir MESB comme suit :

Équation 2.2 Calcul de la concentration en SDB

$$\mathbf{SDB \approx SDF = STF\text{-}MESF}$$

Équation 2.3 Calcul de la concentration en MESB

$$\mathbf{MESB = STB - SDF}$$

La teneur en MES du lisier de vache-génisse brut a, quant à elle, été mesurée par la méthode standard.

Pour la mesure des ST de la fraction solide, les échantillons subissaient préalablement une étape de congélation/décongélation, puis étaient centrifugés à environ 172 g, dans une centrifugeuse *Sorvall RC 5C Plus* de *Du Pont*, avec un rotor *HB-4* (capacité de 4 x50 mL) pendant 1 min, afin de retirer l'eau superficielle, car les solides étaient trop hétérogènes pour permettre une mesure directe des ST.

Pour la mesure de l'azote total Kjeldahl (N-NTK), les échantillons ont d'abord été digérés selon la méthode no. 4500-Norg D (APHA, 1999). Les ions solubles, P-PO_4 (comprenant PO_4^{3-}, HPO_4^{2-} et H_2PO4^-) et N-NH_4^+ ont été marqués selon les méthodes colorimétriques QuickChem no 10-115-01-1-B (P) et QuickChem no 10-107-06-2-B (NH_4^+ et NTK), puis analysées avec un autoanalyseur *Technicon* de *Lachat Instruments* (Loveland, CO, USA). Les échantillons de lisier brut et de fraction liquide ont été conservés à l'aide d'une solution de H_2SO_4 à une concentration de 0.2% v v^{-1}.

Les teneurs en P_{tot} et métaux ont été déterminées par spectrophotométrie à émission dans le plasma (ICP-AES) sur un appareil *Varian* (modèle *Vista AX CCO Simultaneous ICP-AES*, Palo Alto, CA, USA). La digestion des échantillons de lisier (1 g sec d'échantillon) a été réalisée selon la méthode MENVIQ.89.12/213.Mét 1.3. Un échantillon certifié CRM PQ-1 (lot #7110C513, *CANMET, Canadian Certified Reference Materials Project* (CCRMP)) a également été digéré en tant que témoin. Des contrôles de qualité ont été effectués en analysant des échantillons liquides certifiés (lot SC0019251, no. catalogue 900-Q30-002, multi-elements standard, *SCP Science*, Lasalle, QC, Canada). La conservation des échantillons a été faite par ajout d'acide nitrique (HNO_3) à une concentration de 5% v v^{-1}.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

Ce chapitre se divise en cinq sections, une par type de lisier. 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 Lisier de veau (A)

3.1.1 Tests de polymères (A-POL)

Les résultats des tests de polymère sur le lisier de veau sont présentés en trois temps, soit ceux réalisés en pré-test avec les polymères des familles anioniques, neutres et cationiques (POL-1), ceux réalisés en cônes Imhoff, avec une solution de polymère de 1 g L^{-1} (POL-2), et ceux réalisés avec une solution de polymère de 5 g L^{-1} (POL-3).

La Figure 3.1 qui suit donne les performances de divers polymères pour la séparation, la floculation et le surnageant avec l'essai A-POL-1.

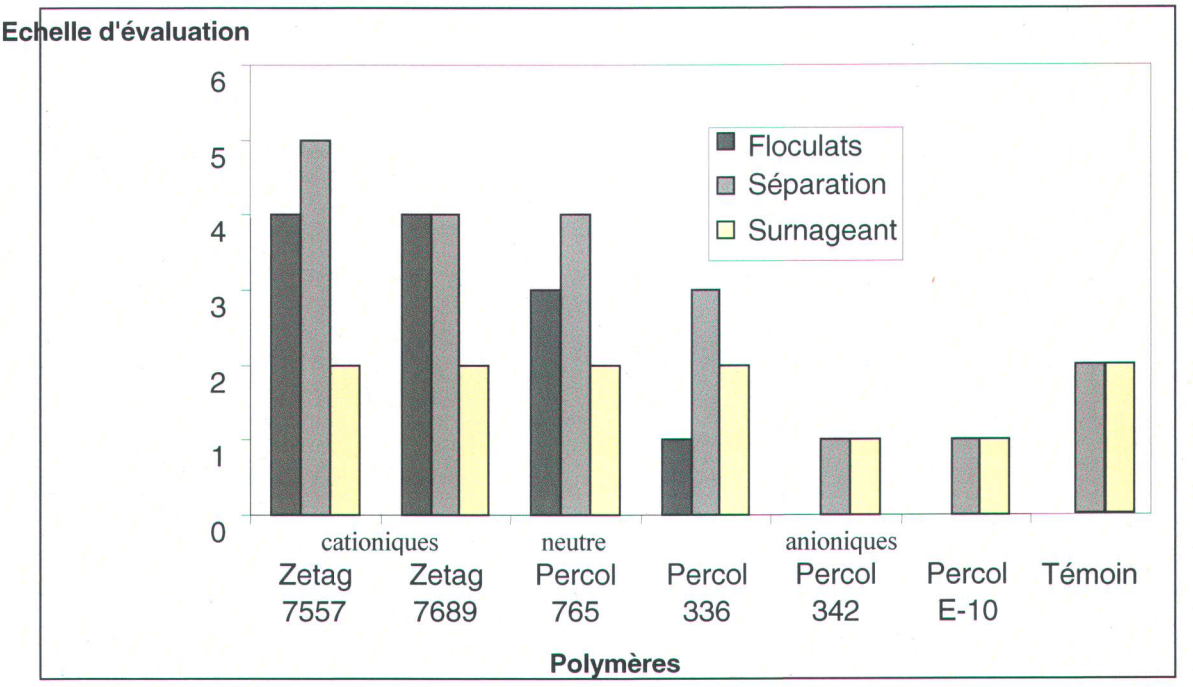

Figure 3.1 Performances des polymères anioniques, neutres et cationiques en termes de séparation, de floculation et de surnageant lors des essais A-POL-1

L'ajout de polymère a eu un effet bénéfique sur la floculation, la séparation et le surnageant. Les polymères les plus performants ont été Zetag 7689 et Zetag 7557, alors que les moins performants furent Percol 342 et Percol E-10. Les meilleurs résultats ont montré des gros flocs (4) pour la floculation, une flottation moyenne (4) pour la séparation et un surnageant clair (2).

En somme, les résultats de l'essai A-POL-1 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.

Le Tableau 3.1 présente les indices ICMF et ICQF obtenus pour les tests POL-2 et 3 suite à un temps de contact lisier/polymère de 18 h.

Tableau 3.1 Valeurs des indices ICQF et ICMF obtenues lors des essais A-POL-2 et A-POL-3*

Paramètres	Témoin sans polymère	Essais A-POL-2					Essais A-POL-3		Essais A-POL-2				
		Conc. Zetag 7557							Conc. Zetag 7689				
		(% v v^{-1})							(% v v^{-1})				
		5	10	13	17	20	1	5	5	10	13	17	20
ICQF	A	M	M	M	F	M	M	F	A	B	M	M	F
ICMF	A	B	M	B	B	M	B	B	A	M	B	M	M

* Essais de flottation d'une durée de 18 h à 22°C.

Concernant l'essai A-POL-2 (solution mère à 1 g L^{-1}), le témoin ainsi que le test de polymère Zetag 7689 à 5% v v^{-1} n'ont pas fonctionné (A = aucune flottation). Le fait que le témoin n'ait donné aucun résultat de flottation permet d'observer que la flottation biologique, bien que faisant appel à des principes naturels, ne peut être obtenue sans l'ajout de polymère.

Certaines concentrations de polymère permettent d'obtenir de bons résultats de flottation. La flottation ne semble toutefois pas réellement s'améliorer lorsque la concentration en polymère augmente. Cette constatation, en plus des considérations économiques, a guidé le choix de la concentration de polymère à 13% v v^{-1} pour les essais suite au test A-POL-2. De plus, les essais à 0,05 g L^{-1} (1% v v^{-1} de polymère POL-3 et 5% v v^{-1} POL-2) donnent des résultats similaires en ce qui concerne les indices ICQF et ICMF et lors des essais B-POL-3, la concentration la plus élevée (5% v v^{-1}) a donné de moins bons résultats de qualité de flottation que celle à 1% v v^{-1} ($ICQF_{5\%\,v\,v^{-1}} < ICQF_{1\%\,v\,v^{-1}}$). De nombreuses études (principalement touchant au traitement des eaux usées et des boues de station d'épuration) indiquent qu'une concentration trop élevée en polymère engendre un effet négatif sur la floculation (Abu-Orf et Dentel, 1997 ; Lynch et Novak, 1991 ; Vesilind, 1988). Il est donc possible que la concentration de 5% v v^{-1} à 5 g L^{-1} soit trop élevée.

Les résultats des mesures physico-chimiques obtenues suite aux essais A-POL-2 et A-POL-3 sont montrés aux Tableaux 3.2, 3.3 et 3.4.

Tableau 3.2 Effet de la concentration de polymère Zetag 7557 lors de l'essai A-POL-2*

Paramètres	Unités	Lisier brut	Témoin sans polymère	Conc. Zetag 7557 (% v v^{-1})				
				5	10	13	17	20
ST	g L^{-1}	8,26±0,28	7,58±0,09	7,07±0,09	6,64±0,04	6,87±0,22	5,90±0,19	5,68±0,06
	% enl.		*8,20*	*14,4*	*19,6*	*16,8*	*28,6*	*31,2*
MES	g L^{-1}	2,33±0,68	0,39±0,15	0,12±0,04	0,14±0,05	0,07±0,03	0,05±0,03	0,09±0,01
	% enl.		*77,5*	*91,1*	*91,6*	*95,4*	*98,0*	*96,7*
Siccité (FS)	%		8,40	10,3	9,00	10,1	9,60	8,80
N-NTK	mg L^{-1}	1160	1000	1250	1200	1160	1130	1160
	(% enl.)		*13,8*	*-7,76*	*≈0*	*≈0*	*≈0*	*≈0*
$N\text{-}NH_4$	mg L^{-1}	941±54	978±52	984±72	969±85	914±28	920±54	854±32
	% enl.		*≈0*	*≈0*	*≈0*	*≈0*	*≈0*	*9,25*
N-org	mg L^{-1}	219	22,0	316**	231	246	210	306
	% enl.		*90,0*	*-44,3***	*≈0*	*-12,3*	*≈0*	*-39,7*
P_{tot}	mg L^{-1}	280±12	200±9	159±3	163±7	175±25	150±6	134±14
	% enl.		*28,4*	*43,2*	*41,6*	*37,6*	*46,3*	*51,9*
$P\text{-}PO_4$	mg L^{-1}	140±10	129±24	217±51***	168±13***	181±32***	175±12***	194±25***
	% enl.		*8,30*	*-55,0****	*-20,0****	*-29,3****	*-25,0****	*-38,6****
P-org	mg L^{-1}	140±2	71,0±33,4	-58,0***	*≈0*	*≈0*	-25,0***	-60,0***
	% enl.		*49,3*	-	-	-	-	-
$N\text{-}NH_4/P_{tot}$	-	3,35	4,87	6,17	5,93	5,22	6,11	6,33

* Essais de flottation d'une durée de 18 h à 22°C.

** Valeurs élevées : Le N-org étant calculé par différence entre N-NTK et $N\text{-}NH_4$, la valeur de N-NTK ayant légèrement augmentée, il en va de même pour la concentration en N-org, qui est sans doute surévaluée ici. Il ne s'agit pas de valeurs incohérentes.

*** Valeurs incohérentes : il n'est pas possible d'expliquer pourquoi ces valeurs de $P\text{-}PO_4$ sont plus élevées que celles du P_{tot}. Ceci entraîne inévitablement des valeurs de concentration en P-org négatives (P-org = P_{tot} -$P\text{-}PO_4$). L'enlèvement n'a donc aucun intérêt ici, et n'est pas indiqué.

Tableau 3.3 Effet de la concentration de polymère Zetag 7689 lors des essais A-POL-2*

Paramètres	Unités	Lisier brut	Témoin sans polymère	Conc. Zetag 7689 (% v v^{-1})				
				5	10	13	17	20
ST	g L^{-1}	8,26±0,28	7,58±0,09	5,82±1,12	6,16±0,05	5,97±0,05	5,72±0,12	5,40±0,05
	% enl.		*8,2*	*29,6*	*25,4*	*27,8*	*30,8*	*34,6*
MES	g L^{-1}	2,33±0,68	0,39±0,15	0,05±0,01	0,05±0,02	0,04±0,01	0,03±0,01	0,07±0,01
	% enl.		*77,5*	*97,9*	*97,6*	*98,2*	*99,0*	*98,5*
Siccité (FS)	%		8,4	9,4	9,6	8,7	8,6	8,6
N-NTK	mg L^{-1}	1160	1000	1290	1360	1090	1140	1030
	% enl.		*13,8*	*- 11,2*	*- 17,2*	*6,0*	*≈0*	*11,2*
N-NH_4	mg L^{-1}	941±54	978±52	947±41	1050±10	947±15	939±48	843±23
	% enl.		*≈0*	*≈0*	*- 11,6*	*≈0*	*≈0*	*10,4*
N-org	mg L^{-1}	219	22,0	343**	310**	143	201	187
	% enl.		*90,0*	*-56,6***	*-41,6***	*34,7*	*8,2*	*14,6*
P_{tot}	mg L^{-1}	280±12	200±9	190±23	167±23	153±18	137±6	191±87
	% enl.		*28,4*	*32,0*	*40,4*	*45,2*	*51,1*	*31,7*
P-PO_4	mg L^{-1}	140±10	129±24	216±31***	179±11***	175±13***	230±29***	148±21
	% enl.		*8,3*	*-54,3****	*-27,9****	*-25,0****	*-64,3****	*≈0*
P-org	mg L^{-1}	140±22	71±33	-26±54***	-12±34***	-22±31***	-93±35***	43±108
	% enl.		*49,3*	-	-	-	-	*69,3*
N-NH_4/P_{tot}	-	3,35	4,87	4,96	6,27	6,16	6,85	4,40

* Essais de flottation d'une durée de 18 h à 22°C.

** Valeurs élevées : Le N-org étant calculé par différence entre N-NTK et N-NH_4, la valeur de N-NTK ayant légèrement augmentée, il en va de même pour la concentration en N-org, qui est sans doute surévaluée ici. Il ne s'agit pas de valeurs incohérentes.

*** Valeurs incohérentes : il n'est pas possible d'expliquer pourquoi ces valeurs de P-PO_4 sont plus élevées que celles du P_{tot}. Ceci entraîne inévitablement des valeurs de concentration en P-org négatives (P-org = P_{tot} -P-PO_4). L'enlèvement n'a donc aucun intérêt ici, et n'est pas indiqué.

Tableau 3.4 Effet de la concentration de polymère Zetag 7557 lors des essais A-POL-3*

Paramètres	Unités	Lisier brut	Témoin sans polymère	Conc. Zetag 7557 (% v v^{-1})	
				1	5
ST	g L^{-1}	8,26±0,28	7,58±0,09	7,14±0,05	6,48±0,06
	% enl.		*8,02*	*13,6*	*21,5*
MES	g L^{-1}	2,33±0,68	0,39±0,15	0,09±0,02	0,08±0,04
	% enl.		*77,5*	*92,9*	*95,8*
Siccité (FS)	%		8,40	9,80	10,9
N-NTK	mg L^{-1}	1160	1000	1320	1220
	(% enl.)		*13,8*	*- 13,8*	*- 5,2*
N-NH_4	mg L^{-1}	941±54	978±52	1100±91	1040±83
	% enl.		*- 3,9*	*- 16,9*	*- 10,5*
N-org	mg L^{-1}	219	22,0	220	200
	% enl.		*90,0*	*≈0*	*8,7*
P_{tot}	mg L^{-1}	280±12	200±9	202±17	188±6
	% enl.		*28,4*	*27,8*	*32,8*
P-PO_4	mg L^{-1}	140±10	129±24	276±22**	233±16**
	% enl.		*8,3*	*- 97,1***	*- 66,4***
P-org	mg L^{-1}	140±22	71±33	-74**	-45**
	% enl.		*49,3*	-	-
N-NH_4/P_{tot}	-	3,35	4,87	5,41	5,50

* Essais de flottation d'une durée de 18 h à 22°C.

** Valeurs incohérentes : il n'est pas possible d'expliquer pourquoi ces valeurs de P-PO_4 sont plus élevées que celles du P_{tot}. Ceci entraîne inévitablement des valeurs de concentration en P-org négatives (P-org = P_{tot} -P-PO_4). L'enlèvement n'a donc aucun intérêt ici, et n'est pas indiqué.

Au cours des essais A-POL-2, l'enlèvement des MES est élevé (entre 91,1 et 99,0%) et permet d'atteindre une concentration finale inférieure à 3 g L^{-1}, pour tous les tests. Ceci indique principalement une bonne séparation solide/liquide (S/L). Bien que le témoin sans polymère atteigne les objectifs escomptés (MES = 0,39±0,15 g L^{-1}), l'enlèvement est moins important (77,5%). Une simple décantation du lisier (phénomène naturelle sans polymère) comme c'est le cas pour le témoin, est moins efficace que la flottation biologique. Cependant, notons que la teneur initiale en MES du lisier de veau A (2,33±0,68 g L^{-1}) est déjà inférieure à 3 g L^{-1}.

Par contre, la siccité de la fraction solide (FS) est rarement supérieure à 10%, comme préconisé pour le lisier de porc. Seules les concentrations de 5 et 13% v v^{-1} de Zetag 7557 donnent des valeurs supérieures (10,3 et 10,1% respectivement).

De même, le rapport $N\text{-}NH_4/P_{tot}$ ne dépasse jamais le seuil minimal fixé pour le lisier de porc, soit 7. Ceci est attribuable au fait que le lisier de veau brut est plus faiblement concentré en azote que le lisier de porc. L'enlèvement du phosphore de la fraction liquide est aussi modéré avec des valeurs comprises entre 32 et 52%, ce qui correspond à des rendements plus bas que lors du traitement du lisier de porc (Bélanger 2002). La teneur en $N\text{-}NH_4$ varie très peu au cours des essais, et les enlèvements négatifs des essais (témoin, 5 et 10% v v^{-1}) comme ceux positifs (13, 17 et 20% v v^{-1}) sont considérés comme proche d'un enlèvement nul, surtout après avoir pris note des écart-types qui restent compris entre 5 et 10%. Les faibles rapports ne peuvent donc être la cause d'une perte d'azote ammoniacal.

Les teneurs en N-NTK sont considérées comme relativement stables au cours du procédé. En effet, les variations par rapport au lisier brut (1160 mg L^{-1}) sont faibles (concentrations comprises entre 1030 et 1360 mg L^{-1}), alors que la digestion des échantillons pour cette analyse nécessite d'amener le lisier à ébullition et une partie de l'échantillon peut être perdue en débordant du tube. Ces valeurs ne peuvent être données qu'à titre indicatif, pour l'estimation de la teneur en azote organique (N-org). Ainsi, d'après les résultats, la teneur en N-org est faible, puisque la différence entre N-NTK et ammonium est négligeable quel que soit l'échantillon.

En conclusion, le choix d'un polymère en particulier est difficile, puisque dans cette expérience, les deux polymères ont bien fonctionné. Le choix s'est donc porté sur Zetag 7557 à 13% v v^{-1}, car il est le plus souvent utilisé pour le traitement des eaux usées.

Comme présenté, les tests A-POL-3 ont été complétés en utilisant le polymère Zetag 7557 à 5 g L^{-1} à une concentration de 1 et 5% v v^{-1}.

Les résultats du test POL-3 indiquent que l'enlèvement des MES est de nouveau supérieur à 90% pour 1% v v^{-1} et 5% v v^{-1} de polymère à 5 g L^{-1} (92,9 et 95,8% respectivement), après 18 h d'essai, et les concentrations finales sont inférieures à 3 g L^{-1} (0,09±0,02 et 0,08±0,04 g L^{-1} respectivement).

La siccité de la FS est près de 10% de solides pour la concentration de 1% v v^{-1}, et de 10,9% pour une concentration en polymère de 5% v v^{-1}. Cette constatation est intéressante car le fait d'ajouter un volume réduit de solution de polymère entraînerait la formation d'une couche de solides flottants moins humide.

Le rapport $N\text{-}NH_4/P_{tot}$ reste inférieur à 7 bien qu'il soit plus élevé pour les essais dont les solides ont flotté par rapport aux essais pour lesquels les solides ont décantés (flottation naturelle sans polmyère). L'enlèvement en P_{tot} est toutefois moins efficace que pour le test A-POL-2 avec des rendements de 27,8 et 32,8%. Comme pour les essais A-POL-2, la variation de la teneur en $N\text{-}NH_4$ peut être considérée proche de 0%, et l'enlèvement nul. Ce n'est donc pas la cause des faibles rapports $N\text{-}NH_4/P_{tot}$.

Comme dans le cas du test A-POL-2, les teneurs en N-NTK sont stables et les variations observées en comparaison au lisier brut sont négligeables (proches de 0%). Ces résultats confirment la faible teneur en N-org en comparaison avec les teneurs en ions ammonium.

Quel que soit le test, les essais de flottation naturelle (témoins) ne sont pas concluants, car en moyenne, la décantation entraîne notamment un enlèvement moins important de MES et de P_{tot} dans la fraction liquide, alors qu'elle augmente celui du $N\text{-}NH_4$, diminuant ainsi le rapport $N\text{-}NH_4/P_{tot}$.

3.1.2 Tests de tamisage et de dilution du lisier (A-TAM)

Comme indiqué précédemment, le lisier a été ajusté à différentes teneurs en solides totaux avant d'être tamisé (Tableau 3.5). Les caractéristiques des lisiers bruts pour les essais avec tamisage sont présentées aux Tableaux 3.6 à 3.9.

Tableau 3.5 Dilutions du lisier A pour le test A-TAM

Noms lisiers bruts NT du test A-TAM	Dilutions
A1	1/2,5
A2	1/1,6
A3	1/1,3
A4	Aucune

Tableau 3.6 Caractéristiques du lisier brut A1 lors des essais A-TAM

Paramètres	Unités	Lisier A1		
		NT	T1	T2
ST	$g\ L^{-1}$	3,69±0,18	3,73±0,10	3,24±0,10
MES	$g\ L^{-1}$	1,76±0,04	1,51±0,30	0,72±0,09
N-NTK	$mg\ L^{-1}$	990	953	750
$N\text{-}NH_4$	$mg\ L^{-1}$	675±20	640±30	573±66
N-org	$mg\ L^{-1}$	315	313	177
P_{tot}	$mg\ L^{-1}$	136±3	128±8	111±8
$P\text{-}PO_4$	$mg\ L^{-1}$	142±12	120±12	97±22
P-org	$mg\ L^{-1}$	≈0	8,0±20,1	13,8±30,3
$N\text{-}NH_4/P_{tot}$	-	4,95	4,99	5,19

Tableau 3.7 Caractéristiques du lisier brut A2 lors des essais A-TAM

Paramètres	Unités	Lisier A2		
		NT	T1	T2
ST	$g\ L^{-1}$	5,99±0,14	5,70±0,20	4,80±0,03
MES	$g\ L^{-1}$	2,85±0,07	2,33±0,22	1,13±0,03
N-NTK	$mg\ L^{-1}$	1620	1780	1060
$N\text{-}NH_4$	$mg\ L^{-1}$	1160±145	1370±69	774±22
N-org	$mg\ L^{-1}$	460	410	286
P_{tot}	$mg\ L^{-1}$	183±9	175±2	174±9
$P\text{-}PO_4$	$mg\ L^{-1}$	192±22	186±22	118±18
P-org	$mg\ L^{-1}$	≈0	≈0	56±48
$N\text{-}NH_4/P_{tot}$	-	6,32	7,82	4,44

Tableau 3.8 Caractéristiques du lisier brut A3 lors des essais A-TAM

Paramètres	Unités	Lisier A3		
		NT	T1	T2
ST	g L^{-1}	7,33±0,22	7,03±0,12	6,43±0,05
MES	g L^{-1}	3,09±0,17	2,75±0,26	1,42±0,14
N-NTK	mg L^{-1}	1600	1520	1570
$N\text{-}NH_4$	mg L^{-1}	1070±54	1040±52	1006±34
N-org	mg L^{-1}	530	480	560
P_{tot}	mg L^{-1}	250±18	107±3*	231±13
$P\text{-}PO_4$	mg L^{-1}	163±13	155±9	152±10
P-org	mg L^{-1}	87±31	-48*	79±23
$N\text{-}NH_4/P_{tot}$	-	4,30	9,71*	4,35

*Valeur incohérente : la teneur en P_{tot} est inférieure à celle des $P\text{-}PO_4$ et des autres essais. Il est impossible d'expliquer cette incohérence.

Tableau 3.9 Caractéristiques du lisier brut A4 lors des essais A-TAM

Paramètres	Unités	Lisier A4		
		NT	T1	T2
ST	g L^{-1}	9,52±0,29	9,36±0,08	8,26±0,17
MES	g L^{-1}	5,14±0,42	5,80±3,25	2,16±0,09
N-NTK	mg L^{-1}	1730	1850	1710
$N\text{-}NH_4$	mg L^{-1}	1325±94	1370±97	1240±70
N-org	mg L^{-1}	400	480	470
P_{tot}	mg L^{-1}	332±22	324±6	309±5
$P\text{-}PO_4$	mg L^{-1}	261±28	201±18	256±20
P-org	mg L^{-1}	71±49	123±24	53±25
$N\text{-}NH_4/P_{tot}$	-	3,99	4,24	4,01

Le résultat des analyses des lisiers bruts tamisés confirment que quelque soit les éléments pris en considération (P_{tot}, $N\text{-}NH_4$, etc.), plus la teneur en solides totaux est importante, plus la concentration de l'élément augmente. Les nutriments sont donc principalement sous forme liée aux particules du milieu. Ainsi, le tamisage, en diminuant la teneur en solides totaux mais surtout en MES dans l'échantillon, a produit le même effet que la dilution du lisier.

Seuls les indices ICMF et ICQF du lisier A4 pour lequel la flottation a fonctionné ont été calculés (Tableau 3.10). Le meilleur résultat a donc été obtenu avec le lisier non tamisé et à 9,5 g L^{-1} de ST (Tableau 3.11), pour lequel de gros flocs (4), une flottation moyenne (4) et un surnageant très clair (3) ont été obtenus.

Tableau 3.10 Valeurs des indices ICQF et ICMF obtenues lors des essais A4-TAM*

Paramètres	Essais A4-TAM		
	NT	T1	T2
ICQF	B	A	F
ICMF	B	A	B

* Essais de flottation d'une durée de 18 h à 22°C avec le polymère Zetag 7557 (1 g L^{-1}) à 13% v v^{-1}.

Les tests de flottation ont montré que le tamisage (1 et 2 mm de diamètre de maille), ainsi qu'une dilution du lisier (la dilution a été réalisée avec de l'eau du robinet) ne permet aucune flottation, après 18 h de test. Seul le témoin non dilué et le lisier non tamisé (A4-NT) et tamisé à 2 mm (A4-T2) permet d'obtenir une flottation, après 18 h d'essai.

Tableau 3.11 Effet du tamisage et de la dilution lors des essais A4-TAM*

Paramètres	Unités	Lisier brut A4			Essais A4-TAM		
		NT	T1	T2	NT	T1	T2
ST	g L^{-1}	9,52±0,29	9,36±0,08	8,26±0,17	5,33±0,09	5,48±0,50	6,16±0,12
	% enl.				*44,0*	*41,4*	*25,4*
MES	g L^{-1}	5,14±0,42	5,80±3,25	2,16±0,09	0,10±0,01	0,09±0,01	0,06±0,04
	% enl.				*98,2*	*98,4*	*97,3*
Siccité (FS)	%	-	-	-	11,0	10,9	9,80
N-NTK	mg L^{-1}	1730	1850	1710	1340	1060	1210
	% enl.				*22,4*	*42,7*	*29,2*
$N\text{-}NH_4$	mg L^{-1}	1325±94	1370±97	1240±70	1000±15	792±76	987±81
	% enl.				*24,2*	*42,4*	*20,4*
N-org	mg L^{-1}	400	480	470	340	268	223
	% enl.				*15,0*	*33,0*	*44,3*
P_{tot}	mg L^{-1}	332±22	324±6	309±5	166±7	140±5	167±5
	% enl.				*50,1*	*56,7*	*45,8*
$P\text{-}PO_4$	mg L^{-1}	261±27	201±18	256±20	183±11**	140±9	172±14**
	% enl.				*29,9*	*30,3*	*32,8*
P-org	mg L^{-1}	71±49	123±24	53±25	≈0**	0,00±13,6	≈0**
	% enl.				-	-	-
$N\text{-}NH_4/P_{tot}$	-	3,99	4,24	4,01	6,06	5,64	5,90

* Essais de flottation d'une durée de 18 h à 22°C avec le polymère Zetag 7557 (1 g L^{-1}) à 13% v v^{-1}.

** Valeurs incohérentes : $P\text{-}PO_4 > P_{tot}$: Bien que la concentration en phosphates soit plus élevée que celle du phosphore total, les méthodes et les date d'analyses sont différentes pour ces deux éléments. Comme le P_{tot} du lisier A est principalement sous forme $P\text{-}PO_4$ et que les concentrations sont très proches, nous avons estimé que ce lisier ne contenait pas ou peu de P-org une fois les essais réalisés.

Le Tableau 3.11 montre l'effet du tamisage sur la performance de la séparation du lisier de veau. L'enlèvement des MES est toujours très élevé (> 97%), quelque soit le lisier ou le résultat de la flottation. Le lisier tamisé à 1 mm (A4-T1) a décanté. Les taux de MES finaux sont très bas par rapport aux exigences (compris entre 0,06±0,04 et 0,10±0,01 g L^{-1}).

De plus, l'enlèvement du P_{tot} dans la fraction liquide est un peu plus élevé avec le lisier tamisé à 1 mm n'ayant pas flotté (A4-T1) car il y a eu moins de mélange liquide/solide lors de l'échantillonnage (56,7% contre 50,1 et 45,8%). Cependant, on note une forte diminution, dans la fraction liquide, de la concentration en N-NH_4 et N-NTK (42-43% enlèvement) pour le lisier tamisé à 1 mm. Pour cette raison, le rapport N-NH_4/P_{tot} est plus faible pour le lisier tamisé à 1 mm. La diminution de la teneur en N-NTK peut être expliquée par l'enlèvement des solides, et donc de l'azote organique. De plus, l'azote sous forme ammoniacale peut avoir diminué pour deux raisons : il est possible qu'il y ait des pertes par volatilisation au cours du procédé, et de plus, une partie du liquide contenant le N-NH_4 se retrouve mélangé aux solides ayant flotté, et ne peut être mesuré dans le liquide final.

Le tamisage fin n'est donc pas à envisager avec du lisier de veau de lait. De plus, il faut noter que préalablement à l'échantillonnage, les veaux avaient été rasés, ce qui risque d'avoir augmenté la teneur en ST du lisier brut puisque les poils (solides en plus) sont entraînés par les eaux de lavage et se retrouvent mélangés au lisier dans la fosse. En conclusion, pour la suite des essais, le lisier de veau (A) ne sera ni dilué, ni tamisé avant les essais.

3.1.3 Tests de température (A-TEM)

L'étude de l'effet de la température a été réalisée dans les conditions opératoires établies précédemment, c'est-à-dire avec une concentration de 13% v v^{-1} de polymère Zetag 7557 (solution à 1 g L^{-1}). Le lisier a été utilisé brut, sans tamisage ni dilution. Le test a duré 18 h, comme auparavant.

Les essais de température ont montré que la flottation ne s'est pas produite à 14°C ou moins. Seuls les tests à 18 et 22 °C ont donné des résultats de positifs. Les indices ICQF et ICMF de ces deux essais sont présentés au Tableau 3.12.

Tableau 3.12 Valeurs des indices ICQF et ICMF obtenues lors des essais A-TEM*

Paramètres	Témoin sans polymère		Essais A-TEM	
	T = 18°C	T = 22°C	T = 18°C	T = 22°C
ICQF	A	A	M	M
ICMF	A	A	B	M

* Essais de flottation d'une durée de 18 h avec le polymère Zetag 7557 (1 g L^{-1}) à 13% v v^{-1}.

Selon l'indice ICMF, la température de 18°C donne de meilleurs résultats de flottation que le test à 22°C. Cependant, lors de l'essai, le contrôle de la température pour les essais à 18°C était difficile à réaliser au laboratoire. Cette température a sans doute augmenté pendant la durée de l'essai (environ 18 h). Les témoins ont confirmé qu'aucune flottation n'est possible sans ajout de polymère. La flottation biologique naturelle non assistée n'est donc pas possible dans le cas de ce lisier. Les résultats des mesures physico-chimiques lors de ces essais sont exposés au Tableau 3.13.

Tableau 3.13 Effet de la température lors des essais A-TEM*

Paramètres	Unités	Lisier brut	Témoin sans polymère		Essais A-TEM	
			T = 18°C	T = 22°C	T = 18°C	T = 22°C
ST	g L^{-1}	8,26±0,28	7,70±0,02	7,52±0,17	6,14±0,14	6,71±0,89
	% enl.		*6,9*	*8,9*	*25,7*	*18,8*
MES	g L^{-1}	2,10±0,19	0,54±0,05	0,67±0,12	0,09±0,01	0,08±0,02
	% enl.		*74,6*	*71,2*	*96,0*	*94,9*
Siccité (FS)	%		7,40	7,30	8,20	9,60
N-NTK	mg L^{-1}	1160	1000	1000	1150	1260
	% enl.		*13,8*	*13,8*	*0,90*	***- 8,60*
$N\text{-}NH_4$	mg L^{-1}	941±54	982±112	942±48	911±43	1010±65
	% enl.		*- 4,40***	*≈0*	*3,20*	*- 7,70***
N-org	mg L^{-1}	219	18,0	58,0	239	250
	% enl.		*91,8*	*73,5*	*-9,13*	*-14,2*
P_{tot}	mg L^{-1}	281±12,3	188±6	198±7	172±2	169±12
	% enl.		*33,1*	*29,3*	*38,6*	*39,9*
$P\text{-}PO_4$	mg L^{-1}	141±12,3	124±12	131±21	112±15	76±8
	% enl.		*11,9*	*6,90*	*20,4*	*45,8*
P-org	mg L^{-1}	140±24,6	64±18	67±28	60±17	123±58
	% enl.		*54,3*	*52,1*	*57,1*	*12,0*
$N\text{-}NH_4/P_{tot}$	-	3,35	5,23	4,75	5,28	6,01

* Essais de flottation d'une durée de 18 h avec le polymère Zetag 7557 (1 g L^{-1}) à 13% v v^{-1}.

** Valeurs incohérentes : Ces valeurs étant proches de 0, nous estimons qu'elles ne peuvent être considérées comme aberrantes, étant donné les erreurs (écart-types).

Des rendements d'enlèvement des MES de 95-96% ont été mesurés dans les deux cas (T = 18 et 22°C). Les témoins sans polymère n'ont pas permis, quant à eux, un enlèvement de plus de 75% des MES. Cependant, la quantité de MES finale est, dans tous les cas, inférieure à 3 g L^{-1}, comme souhaité.

La siccité des FS est demeurée inférieure à la cible de 10%, mais elle s'en rapproche que ce soit pour 18°C (8,2%) ou pour 22°C (9,6%). La siccité des témoins est plus faible, puisque la fraction solide est décantée, et donc mal séparée de la fraction liquide. La flottation avec le lisier de veau étant obtenue en peu de temps, il serait envisageable d'augmenter la siccité de la fraction solide en laissant la séparation S/L continuer après la fin de la flottation.

L'enlèvement du P_{tot} est toujours plus important pour les essais flottés (39-40% d'enlèvement de P_{tot}), en comparaison aux témoins (29-33%) (on peut supposer qu'il s'agit d'un effet filtrant de la masse solide, lors du phénomène de flottation).

Concernant l'évolution de la concentration en ammonium, une légère hausse (7,7%) a été notée à 22°C, alors qu'une faible baisse (3,2%) a été dénotée dans le cas de l'essai à 18°C. L'azote Kjeldahl suit une tendance similaire à l'azote ammoniacal, ses variations ne sont donc pas la cause de l'azote organique, en faible quantité dans le lisier de veau. Ces variations étant faibles, on estime qu'il n'y a pas de changement notable de la concentration en ammonium et en N-NTK.

L'enlèvement des phosphates est plutôt faible, et n'est pas considéré comme représentatif. L'enlèvement le plus important est constaté pour la température de 22°C (45,8%), mais cette valeur paraît un peu élevée.

Somme toute, une augmentation modérée du rapport $N\text{-}NH_4/P_{tot}$ a été constatée suite aux essais, mais celui-ci est demeurée inférieure à 7. Une valeur de 6,0 a tout de même été obtenue pour l'essai à 22°C.

Le choix d'un essai sans ajout de polymère n'est pas envisageable aux vues des résultats des témoins par rapport aux essais de flottation assistée (enlèvement des MES, des ST et du P_{tot} moins élevés).

La température doit donc être contrôlée à une température égale ou supérieure à 18°C pour la flottation biologique du lisier de veau. Une température de 22°C (température ambiante) a été choisie pour la suite des travaux, car elle est plus facile à maintenir.

3.1.4 Tests de vieillissement du lisier (A-AGE)

Les essais de flottation réalisés sur le lisier de veau âgé de 7, 14, 21 et 28 jours ont montré qu'aucune séparation par flottation n'est possible sur ce type de lisier, dans un temps de 24 h. Le lisier de veau doit donc être frais pour permettre la flottation biologique de la fraction solide.

3.1.5 Tests de durée de flottation (A-FLO)

Les Tableaux 3.14 et 3.15 présentent les principaux résultats des essais à différents temps de flottation.

Tableau 3.14 Valeurs des indices ICQF et ICMF obtenues lors des essais A-FLO*

Paramètres	Témoin sans polymère	Essais A-FLO			
	t = 24 h	t = 4 h	t = 8 h	t = 12 h	t = 24 h
ICQF	A	A	A	M	B
ICMF	A	A	A	M	B

* Essais de flottation à 22°C avec le polymère Zetag 7557 (1 g L^{-1}) à 13% v v^{-1}.

Un temps de flottation minimum de 12 h doit être appliqué pour obtenir une bonne qualité de séparation du lisier de veau. De même, une période de 24 h donne une meilleure flottation, laquelle demeure stable après ce temps. Il serait donc important de tester des heures intermédiaires (entre 12 et 18 h) afin de connaître le temps minimal nécessaire. La flottation naturelle ne se fait pas sans ajout de polymère (aucune flottation pour le témoin après 24 h).

Tableau 3.15 Effet de la durée de flottation lors des essais A-FLO*

Paramètres	Unités	Lisier brut	Témoin sans polymère	Essais A-FLO			
			t = 24 h	t = 4 h	t = 8 h	t = 12 h	t = 24 h
ST	g L^{-1}	8,26±0,17	7,47±0,13	5,97±0,08	5,86±0,02	5,81±0,04	5,75±0,47
	% enl.		*9,6*	*27,7*	*29,1*	*29,8*	*30,4*
MES	g L^{-1}	2,91±0,14	0,33±0,07	0,18±0,05	0,10±0,02	0,08±0,01	0,09±0,01
	% enl.		*86,9*	*92,6*	*96,1*	*96,8*	*98,0*
pH	-	7,45	7,62	7,64	7,63	7,69	8,00
POR	mV	-45	-13,0	-11,0	-6,00	-6,00	-8,00
Siccité (FS)	%	-	6,30	5,80	7,70	8,20	13,9
N-NTK	mg L^{-1}	1160	1300	1290	1200	1170	1280
	% enl.		*- 12,1*	*- 11,2*	*- 3,40*	*- 0,90*	*- 10,3*
$N\text{-}NH_4$	mg L^{-1}	941±54	1070±128	1200±32	1150±15	1160±15	1130±21
	% enl.		*- 13,7*	*- 27,5*	*- 22,2*	*- 23,3*	*- 20,1*
N-org	mg L^{-1}	219	230	90,0	50,0	10,0	150
	% enl.		*-5,02*	*58,9*	*77,2*	*95,4*	*31,5*
P_{tot}	mg L^{-1}	281±12	181±10	164±4	166±1	164±3	167±2
	% enl.		*35,5*	*41,4*	*40,8*	*41,4*	*40,5*
$P\text{-}PO_4$	mg L^{-1}	141±11	90,0±4,6	84,0±8,3	83,0±2,1	103±3	86,0±8,9
	% enl.		*36,0*	*40,5*	*41,1*	*26,8*	*38,6*
P-org	mg L^{-1}	140±24	91,0±14,5	80,0±12,0	83,0±3,3	61,0±7	81,0±11,1
	% enl.		*35,7*	*42,9*	*40,7*	*56,4*	*42,1*
$N\text{-}NH_4/P_{tot}$	-	3,35	5,93	7,28	6,90	7,03	6,78

* Essais de flottation à 22°C avec le polymère Zetag 7557 (1 g L^{-1}) à 13% v v^{-1}.

Quelque soit le temps de flottation, un enlèvement des MES supérieur à 92% a été obtenu (exception faite du témoin ayant décanté à 87%). Là encore, tous les essais permettent d'atteindre un taux final de MES inférieur à 3 g L^{-1}.

Une légère augmentation du pH a été mesurée au cours de la période de flottation en comparaison au lisier brut (pH = 7,45), mais sans changements importants.

Des valeurs de POR négatives ont été mesurées aussi bien dans le lisier brut que dans le lisier flotté, ce qui est normal puisque il s'agit d'un milieu non aéré qui devient rapidement anoxique. Cependant, il est possible que le milieu, surtout en surface, soit aérobie, car le POR est proche de 0 mV.

Les variations des teneurs en N-NTK indiquent une légère augmentation, ce qui est peu probable pour une durée de test si courte (24 h maximum), car une perte serait ici sans doute dûe à un phénomène microbiologique (section 1.2.6). Ces variations étant faibles, on estime qu'il n'y a pas eu d'évolution notable. L'azote ammoniacal est en légère augmentation, tandis que l'azote organique diminue ; on pourrait envisager qu'il s'agisse d'une réaction d'ammonification (Ni, 1999). Cependant, là encore, le temps de l'essai est court, et cette réaction étant réalisée par des microorganismes, il est peu probable qu'elle ait eu lieu. Dans ce cas, ces valeurs ne sont données qu'à titre indicatif, et permettent de constater, de nouveau, que le lisier de veau contient de l'azote principalement sous forme ammoniacale.

Les rapports $N\text{-}NH_4/P_{tot}$ ont augmenté, et atteignent la valeur cible de 7. Cette augmentation est due à l'enlèvement du phosphore (environ 40% dans tous les cas) grâce à une bonne séparation solide/liquide (Annexe E).

Une partie de la fraction soluble du phosphore ($P\text{-}PO_4$) a été enlevée (26,8 et 38,6% pour lesx essais ayant flottés) de la fraction liquide. Cette fraction étant la plus rapidement disponible pour les plantes, elle sera en quantité moins importante dans la fraction liquide et présentera donc moins de risque pour l'environnement dans les zonnes en surplus de phosphore.

Là encore, la décantation naturelle du témoin n'est pas concluante (enlèvement moins important que les autre essais pour les ST, MES, et P_{tot}).

3.1.6 Conclusion pour la flottation du lisier de veau (A)

En conclusion, le lisier de veau semble bien adapté au traitement par flottation biologique. En effet, le temps de flottation est assez court (18 h maximum) et le type et la concentration en polymère correspondent à ceux employés actuellement pour LISOX (Zetag 7557, un cationique fort, à 13% v v^{-1}). Par contre, il faut diminuer la concentration de 5% v v^{-1}de l'essai POL-3, puisque elle entraîne une moins bonne flottation. De plus, il n'est pas nécessaire de diluer ou de tamiser le lisier avant de pouvoir le traiter, ce qui est intéressant, car ceci permet de diminuer les étapes, donc les coûts et la durée du traitement. Lorsqu'il n'y a pas d'ajout de polymère, le phénomène en jeu est naturel. Quel que soit le test, ces témoins donnaient de moins bons résultats et aucune flottation. Cependant, dans presque tous les cas où la flottation a fonctionné, trois phases étaient observées : les solides flottés, le liquide en dessous et un léger dépôt au fond du cône. Le volume de ce dépôt était, pour les essais de séparation les plus efficaces, très faible en comparaison au volume de solides flottés (Annexe E). Il reste toutefois que le Québec est un faible marché de production de veaux et que ce marché est encore peu développé, mais doit également se soumettre aux réglementations en vigueur.

3.2 Lisier de vache-génisse (B)

3.2.1 Tests de polymères (B-POL)

Comme pour les essais sur le lisier de veau, les résultats des tests de polymère sur le lisier de vache-génisse (B) sont présentés en trois étapes (tests B-POL-1, B-POL-2 à 1 g L^{-1} de polymère et ceux à 5 g L^{-1}, B-POL-3).

Lors du test B-POL-1, les mêmes polymères que pour le lisier de veau (A) ont d'abord été préparés, mais ces derniers n'ont donné aucun résultat concluant. Bien qu'il n'ait pas été précédemment sélectionné pour réaliser les essais au laboratoire, le polymère Zetag 7654 a été testé, car il est le plus cationique des polymères, avec un poids moléculaire et une densité de charge très élevés. Cependant, même avec celui-ci, aucune formation de flocs n'a été observée. Ainsi, les

caractéristiques du lisier brut ne sont pas propices à la floculation. En effet, la teneur initiale en ST du lisier brut était en moyenne de 52,5±3,5 g L^{-1}. À cette concentration, il n'est pas possible d'obtenir de bons résultats de flottation. Le lisier a donc été dilué, jusqu'à une concentration en ST de 12,1±2,8 g L^{-1} (dilution 1/4) en moyenne pour le test B-POL-1.

Avec cette concentration en ST, seul le polymère Zetag 7654 a permis l'obtention de flocs. En effet, contrairement au lisier de veau, les polymères cationiques comme Zetag 7557 ou 7689 n'ont produit aucune formation de flocs. Cependant, même avec ce polymère, les flocs formés étaient peu stables et petits (2). Il était impossible, dans le bécher, de distinguer si une séparation avait lieu (0) et le surnageant était toujours opaque (0).

Les tests B-POL-2 et B-POL-3 ont donc uniquement été réalisés avec le polymère Zetag 7654, puisqu'il semble que ce soit le seul à permettre une certaine floculation. Le lisier a de nouveau été dilué (environ 1/2), ses caractéristiques sont indiquées aux Tableaux 3.17 et 3.18.Comme les essais précédents avec le lisier de veau A ont démontré qu'une concentration trop élevée de polymère (5% v v^{-1} à 5 g L^{-1}) diminue la qualité de la flottation, nous avons choisi de remplacer la concentration de l'essai B-POL-3 de 5% v v^{-1} à 5 g L^{-1} par une concentration de 4% v v^{-1}.

Les essais de flottation ont duré 48 h. Suite à ces tests, différentes concentrations en polymère ont permis d'obtenir de bons résultats. Les indices ICMF et ICQF ont été calculés et sont exposés au Tableau 3.16.

Tableau 3.16 Valeurs des indices ICQF et ICMF obtenues lors des essais B-POL-2 et B-POL-3*

Paramètres	Témoin sans polymère	Essais B-POL-2					Essais B-POL-3	
		Conc. Zetag 7654 (% v v^{-1})						
		5	10	13	17	20	2	4
ICQF	A	A	M	M	M	M	F	M
ICMF	A	A	M	M	M	M	M	M

* Essais de flottation d'une durée de 48 h à 22°C.

La flottation a été observée pour un apport de 10% v v^{-1} et plus de polymère. Cependant, une concentration en polymère de 13% v v^{-1} a été retenue pour la réalisation des essais suivants. Les concentrations plus élevées n'ont pas permis d'améliorer la flottation du lisier de vache-génisse (B). Les essais B-POL-3 indiquent bien une amélioration de la flottation lorsqu'on augmente la concentration de polymère. Les indices pour les essais à la concentration de 0,2 g L^{-1} (B-POL-2 à 20% v v^{-1} et B-POL-3 à 4% v v^{-1}) donnent des résultats similaires. Le volume de polymère pour cette concentration ne semble donc pas influencer la flottation. De la même façon, même si la qualité de la flottation (ICQF) est différente pour les essais à 0,1 g L^{-1} (B-POL-2 à 10% v v^{-1} et B-POL-3 à 2% v v^{-1}), les ICMF sont identiques. On peut donc supposer que la quantité de polymère en terme de volume dans ce cas influence légèrement la flottation, puisque les résultats sont meilleurs pour l'essai B-POL-2 (volume plus important). La encore, pour ce nouveau lisier, la flottation naturelle ne se fait pas (aucune flottation du témoin) et seul l'apport de polymère permet d'obtenir des résultats.

Les principaux résultats des mesures physico-chimiques lors des essais de flottation avec différentes concentrations de polymère (B-POL-2 et B-POL-3) sont présentés au Tableau 3.17 et 3.18.

Tableau 3.17 Effet de la concentration de polymère 7654 lors des essais B-POL-2*

Paramètres	Unités	Lisier brut	Témoin sans polymère	Conc. Zetag 7654 (% v v^{-1})				
				5	10	13	17	20
ST	g L^{-1}	24,1±1,37	9,77±0,26	8,52±0,28	6,55±2,65	8,11±0,34	7,15±0,27	6,81±0,13
	% enl.		*59,5*	*64,7*	*72,9*	*66,4*	*70,4*	*71,8*
MES	g L^{-1}	17,7±1,64	3,26±1,38	1,18±0,22	0,85±0,15	1,00±0,12	0,89±0,34	1,21±0,25
	% enl.		*81,5*	*93,0*	*95,4*	*94,5*	*95,0*	*93,5*
pH	-	7,24	7,47	7,59	7,52	7,54	7,39	7,32
POR	mV	-131	-39,9	-46,8	-43,9	-43,3	-35,2	-33,3
Siccité (FS)	%	-	9,2	7,0	6,6	7,9	7,6	7,7
N-NTK	mg L^{-1}	1230	940	578	558	597	598	463
	% enl.		*23,6*	*53,0*	*54,6*	*51,5*	*51,4*	*62,4*
$N\text{-}NH_4$	mg L^{-1}	549±32	402±22	364±26	397±7	391±8	388±16	283±153
	% enl.		*26,8*	*33,7*	*27,7*	*28,7*	*29,3*	*48,5*
N-org	mg L^{-1}	681	538	214	161	206	210	180
	% enl.		*21,0*	*68,6*	*76,4*	*69,8*	*69,2*	*73,6*
P_{tot}	mg L^{-1}	216±7	61,2±8,9	44,2±1,0	53,9±9,6	53,4±4,1	47,4±1,0	40,9±1,4
	% enl.		*71,6*	*79,5*	*75,1*	*75,2*	*78,0*	*81,0*
$P\text{-}PO_4$	mg L^{-1}	33,6±2,7	8,80±1,09	9,69±3,31	12,3±3,8	10,6±3,4	11,4±6,9	9,27±2,25
	% enl.		*73,8*	*71,2*	*63,5*	*68,5*	*66,2*	*72,4*
P-org	mg L^{-1}	182±10	52,2±9,94	34,3±4,3	41,7±13,5	42,4±7,5	35,6±7,9	31,7±3,6
	% enl.		*71,3*	*81,2*	*77,1*	*76,7*	*80,4*	*82,6*
$N\text{-}NH_4/P_{tot}$	-	2,54	6,56	8,24	7,38	7,32	8,20	6,92

* Essais de flottation d'une durée de 48 h à 22°C.

Tableau 3.18 Effet de la concentration de polymère 7654 lors des essais B-POL-3*

Paramètres	Unités	Lisier brut	Témoin sans polymère	Conc. Zetag 7654 (% v v^{-1})	
				2	4
ST	g L^{-1}	24,1±1,37	9,77±0,26	13,86±0,44	12,63±0,92
	% enl.		*59,5*	*42,6*	*47,7*
MES	g L^{-1}	17,71±1,64	3,26±1,38	2,21±0,47	1,63±0,21
	% enl.		*81,5*	*82,3*	*87,6*
pH	-	7,24	7,47	7,46	7,43
POR	mV	-131	-39,9	-40,8	-37,6
Siccité (FS)	%	-	9,2	n.d.	n.d.
N-NTK	mg L^{-1}	1230	940	889	956
	% enl.		*23,6*	*27,7*	*22,3*
$N\text{-}NH_4$	mg L^{-1}	549±32	402±22	446±30	446±31
	% enl.		*26,8*	*18,8*	*18,8*
N-org	mg L^{-1}	681	538	443	510
	% enl.		*21,0*	*34,9*	*25,1*
P_{tot}	mg L^{-1}	216±7	61,2±8,9	67,0±4,3	60,0±1,1
	% enl.		*71,6*	*68,9*	*72,1*
$P\text{-}PO_4$	mg L^{-1}	33,6±2,7	8,80±1,09	10,9±2,8	7,6±3,2
	% enl.		*73,8*	*67,7*	*77,3*
P-org	mg L^{-1}	182±11	52,2±9,9	56,1±7,1	52,4±4,2
	% enl.		*71,3*	*69,2*	*71,2*
$N\text{-}NH_4/P_{tot}$	-	2,54	6,56	6,65	7,41

* Essais de flottation d'une durée de 48 h à 22°C.

Exception faite des essais de flottation naturelle (témoin), tous les tests réalisés avec une solution de Zetag 7654 à 1 g L^{-1} ont permis d'atteindre un enlèvement supérieur ou égal à 93% de MES dans la fraction liquide et les concentrations finales en MES sont toutes inférieures à 3 g L^{-1} en dehors du témoin (3,26±1,38 g L^{-1}).

Par contre, les teneurs en ST des FS n'atteignent jamais 10%. Elles sont tout de même supérieures à celle du lisier brut initial (5,2%). La fraction solide ainsi obtenue ne pourra donc être exportable qu'une fois sa teneur en eau diminuée.

Une diminution importante du P_{tot} a été notée dans la fraction liquide en comparaison au lisier brut. Les rendements d'élimination du P_{tot} ont ainsi varié entre 75 et 81% pour les essais avec la solution de polymère Zetag 7654 à 1 g L^{-1}, alors qu'un rendement de 72% a été obtenu pour le témoin sans polymère. Cet abaissement notable du P_{tot} a permis de hausser le rapport NH_4/P_{tot} à des valeurs égales ou supérieures à 7 et ce, même si des réductions des concentrations significatives de N-NH_4 (28 à 49%) et de N-NTK (51 à 62%) ont été mesurées lors de ces essais.

Les résultats obtenus pour cet essai n'ont pas permis de déterminer quelle serait la meilleure concentration en polymère à employer. Le choix s'est toutefois porté sur une concentration de 13% v v^{-1} pour la suite des essais avec le lisier de vache-génisse (B), car les résultats des essais B-POL-2 ne s'améliorent pas en augmentant cette concentration.

Le test B-POL-3 a été réalisé à partir du même lisier brut que précédemment (lisier dilué), pour des concentrations en polymère de 2 et 4% v v^{-1}. Les résultats présentés au Tableau 3.18 indiquent que, dans les deux cas, la flottation a lieu. Cependant, une teneur trop faible limite la flottation. Pour une étude à grande échelle, il serait donc préférable de choisir une concentration en polymère supérieure à 2% v v^{-1}, afin de permettre l'obtention de flocs suffisamment gros. Le choix de diminuer la concentration à 4% v v^{-1} pour B-POL-3 était judicieux, puisque cette fois, une concentration plus élevée améliore la flottation.

Les analyses réalisées pour le test B-POL-3 révèlent aussi que les deux concentrations donnent sensiblement les mêmes résultats, moins bons cependant que lors des essais B-POL-2. L'enlèvement des MES est supérieur à 80% dans les deux cas et les concentrations finales sont inférieures à 3 g L^{-1}, mais les résultats sont moins bons que pour l'essai B-POL-2.

Par contre, la teneur en ST de la fraction liquide est légèrement plus élevée que dans le test B-POL-2 (polymère à 1 g L^{-1}). De plus, bien que des mesures précises n'aient pu être effectuées dans ce cas, la teneur en ST de la FS n'a pas atteint la concentration limite de 10%.

Malgré la perte importante en ammonium, le rapport N-NH_4/P_{tot} était supérieur à 7 pour l'essai avec 4% v v^{-1} de polymère et est demeuré près de 7 pour l'essai avec 2% v v^{-1} de polymère (respectivement 7,43 et 6,65). En effet, les rendements d'enlèvement du P_{tot} étaient élevés (68,9% pour 2% v v^{-1} et 72,1% pour 4% v v^{-1}) et permettaient donc d'obtenir ces rapports.

Des taux d'enlèvement plus faibles que pour les essais B-POL-2 ont été constatés dans les essais B-POL-3 pour le N-NH_4 (19%) et le NTK (28 et 22%).

On peut donc en déduire que l'utilisation d'un polymère à 5 g L^{-1} est possible pour le traitement de ce type de lisier par flottation assistée (flottation et non décantation), ce qui permettrait de diminuer la quantité d'eau à utiliser pour sa préparation et, ainsi, de faire des économies non négligeables. Cependant, pour des concentrations finales identiques dans le lisier (20% v v^{-1} à 1 g L^{-1} et 4% v v^{-1} à 5 g L^{-1} ; 10% v v^{-1} à 1 g L^{-1} et 2% v v^{-1} à 5 g L^{-1}), les résultats indiquent qu'il est préférable d'opter pour une solution mère de polymère de 1 g L^{-1} pour avoir un contact lisier/polymère plus grand.

3.2.2 Tests de tamisage et de dilution du lisier (B-TAM)

Les essais de dilution et de tamisage ont été réalisés avec le polymère Zetag 7654 à 13% v v^{-1}. Pour ce lisier, seules des grosseurs de maille 2 et 3 mm ont été choisies, car le tamisage à 1 mm a été considéré comme trop fin, et, d'après les résultats des essais sur le lisier de veau, ne permet pas une bonne flottation. Les dilutions réalisées pour obtenir les lisiers bruts des essais B1-TAM et B2-TAM sont énoncées au Tableau 3.19. Les Tableaux 3.20 et 3.21 présentent les caractéristiques de chacun des lisiers employés pour ces essais.

Tableau 3.19 Dilutions du lisier brut B lors des essais B-TAM

Noms lisiers bruts NT du test B-TAM	Dilutions
B1	1/1,6
B2	1/1,2

Tableau 3.20 Caractéristiques du lisier brut B1 lors des essais B-TAM

Paramètres	Unités	Lisier B1		
		NT	T2	T3
ST	$g\ L^{-1}$	32,3±1,4	24,9±1,8	20,9±1,6
MES	$g\ L^{-1}$	10,4±0,9	8,5±1,8	13,2±1,6
pH	-	7,22	7,21	7,28
POR	mV	-111	-99,8	-102,2
N-NTK	$mg\ L^{-1}$	1140	1990	2150
$N\text{-}NH_4$	$mg\ L^{-1}$	551±169	490±6	180±3
N-org	$mg\ L^{-1}$	589	1500	1970
P_{tot}	$mg\ L^{-1}$	165±13	288±3*	259±19*
$P\text{-}PO_4$	$mg\ L^{-1}$	37,9±2,8	55,2±4,8	104±19
P-org	$mg\ L^{-1}$	127±16	5,21±8,08*	155±38
$N\text{-}NH_4/P_{tot}$	-	3,33	1,70	0,70

* Valeurs incohérentes : Les lisiers tamisés T2 et T3 devraient contenir moins de P_{tot} que le lisier non tamisé NT.

Tableau 3.21 Caractéristiques du lisier brut B2 lors des essais B-TAM

Paramètres	Unités	Lisier B2		
		NT	T2	T3
ST	$g\ L^{-1}$	44,3±1,9	37,9±1,1	42,0±2,4
MES	$g\ L^{-1}$	12,8±1,7	13,7±5,4	28,8±5,0
pH	-	7,18	7,20	7,20
POR	mV	-104	-100	-103
N-NTK	$mg\ L^{-1}$	1910	3140	2930
$N\text{-}NH_4$	$mg\ L^{-1}$	390±90	248±124	290±90
N-org	$mg\ L^{-1}$	1520	2892	2640
P_{tot}	$mg\ L^{-1}$	283±8	486±16*	487±4*
$P\text{-}PO_4$	$mg\ L^{-1}$	65,1±20,3	70,0±41,8	91,9±51,6
P-org	$mg\ L^{-1}$	218±29	416±57	395±56
$N\text{-}NH_4/P_{tot}$	-	3,57	0,51	0,59

* Valeurs incohérentes : Les lisiers tamisés T2 et T3 devraient contenir moins de P_{tot} que le lisier non tamisé NT.

Ainsi, le tamisage peut influencer la concentration des éléments dans le lisier. Suite aux essais de 48 h dont les résultats sont exposés au Tableau 3.23, il apparaît que le tamisage du lisier de vache-génisse donne des résultats similaires au lisier de veau A (essai A-TAM). En effet, le tamisage empêche une formation de gros flocs et nuit donc à la flottation du lisier.

Tableau 3.22 Valeurs des indices ICQF et ICMF obtenues lors des essais B-TAM*

Paramètres	Essais B1-TAM			Essais B2-TAM		
	NT	T2	T3	NT	T2	T3
ICQF	M	A	A	M	A	A
ICMF	M	A	A	M	A	A

* Essais de flottation d'une durée de 48 h à 22°C avec le polymère Zetag 7654 (1 g $L^{-}1$) à 13% v v^{-1}.

Les indices qualitatifs et quantitatifs donnent des résultats identiques, mais ne permettent pas de comparer les variations possibles entre les deux teneurs en ST de départ. En effet, seuls les lisiers non tamisés permettent la flottation, mais les indices sont semblables pour les différentes teneurs en ST.

Afin de comprendre ce qui se produit dans ce cas, toutes les fractions finales du lisier B1 ont été analysées, ainsi que la fraction B2-NT, qui a flotté (Tableau 3.23).

Tableau 3.23 Effet du tamisage et de la dilution lors des essais B-TAM*

Paramètres	Unités	Essais B1-TAM			Essais B2-TAM
		NT	T2	T3	NT
ST	g L^{-1}	12,0±0,3	13,2±0,1	12,5±0,1	15,3±0,5
	% enl.	*62,8*	*46,8*	*40,0*	*65,5*
MES	g L^{-1}	2,76±0,10	3,53±2,75	3,49±0,87	6,45±1,25
	% enl.	*73,5*	*58,5*	*73,6*	*49,5*
pH	-	7,31	7,52	8,11	7,28
POR	mV	-70,5	-92,9	-117	-72,7
Siccité (FS)	%	9,50	10,1	4,90	10,2
N-NTK	mg L^{-1}	711	859	897	1120
	% enl.	*37,6*	*56,8*	*58,3*	*41,4*
$N\text{-}NH_4$	mg L^{-1}	496±3	303±122	479±45	360±23
	% enl.	*9,9*	*38,9*	*7.9*	*7,7*
N-org	mg L^{-1}	215	556	418	760
	% enl.	*63,5*	*62,9*	*78,8*	*50,0*
P_{tot}	mg L^{-1}	71,1±3,9	79,0±13,1	53,8±4,7	101±7
	% enl.	*56,9*	*80,7*	*54,7*	*64,4*
$P\text{-}PO_4$	mg L^{-1}	25,3±4,6	15,4±3,5	22,3±7,4	34,4±11,2
	% enl.	*33,2*	*72,1**	*78,6**	*47,1*
P-org	mg L^{-1}	45,8±8,5	63,6±16,6	31,5±12,1	66,6±18,4
	% enl.	*63,9*	*-1121**	*79,7**	*69,4*
$N\text{-}NH_4/P_{tot}$	-	6,98	2,07	8,89	3,57

* Essais de flottation d'une durée de 48 h à 22°C avec le polymère Zetag 7654 (1 g L^{-1}) à 13% v v

** Valeurs incohérentes : Les lisiers bruts tamisés T2 et T3 devraient contenir moins de P_{tot} que le lisier non tamisé NT. Ces incohérences sont donc la cause des concentrations du lisier brut B1-TAM.

Dans le cas du lisier B1-NT non tamisé, l'enlèvement en MES est élevé (73,5%), tandis que pour le lisier B2-NT, même si la flottation a fonctionné, l'enlèvement est faible (49,5%). Les résultats sont donc assez variables. Pour le lisier B1-T3, qui n'a pas permis de flottation à cause du tamisage, le taux de MES a également fortement diminué (73,6%). Dans ce cas, il serait donc préférable d'employer un système de décantation plutôt que de flottation. Le lisier B1-T2 a donné également de meilleurs résultats d'enlèvement des MES que le lisier B2-NT (malgré sa décantation). Cependant, seul l'essai B1-TAM-NT répond aux exigences de 3 g L^{-1} pour le taux de MES (2,76±0,10 g L^{-1}), même après tamisage.

L'enlèvement du P_{tot} dans la fraction liquide est satisfaisant pour les deux sortes de lisiers avec des valeurs supérieures à 57%. Le rapport $N\text{-}NH_4/P_{tot}$ était nettement inférieur à 7 pour l'essai B2-NT en raison d'une forte diminution de la concentration en ammonium, sans doute pour les mêmes raisons que précédemment : la volatilisation de l'ammonium pendant la flottation (le test ayant duré 48h), et la perte d'une partie de cette ammonium dans le liquide interstitiel de la FS.

Toutes les teneurs en N-NTK et $P\text{-}PO_4$ ont fortement diminué, particulièrement pour les lisiers tamisés. La diminution des concentrations en N-NTK des lisiers tamisés s'explique par la perte de l'azote organique qui constitue, dans le lisier de vache-génisse, une plus grande fraction du N-NTK que dans le lisier de veau. Comme l'N-org est principalement lié à la FS, il a été retenu par le tamisage.

Une teneur en ST d'environ 3% au départ favorise donc une meilleure flottation. La concentration en ST du lisier brut devra être vérifiée et une dilution effectuée avant d'amorcer la flottation.

3.2.3 Tests de température (B-TEM)

Les essais de température ont été réalisés sans tamisage et toujours avec le polymère Zetag 7654 à 13% v v^{-1}, comme préconisé dans les tests précédents. Le lisier brut a été dilué à 1/1,5 (Tableau 3.25) et l'essai a duré 48 h. Le Tableau 3.24 indique les valeurs des indices ICMF et ICQF obtenus suite à la flottation.

Tableau 3.24 Valeurs des indices ICQF et ICMF obtenues lors des essais B-TEM*

Paramètres	Témoin sans polymère				Essais B-TEM			
	T = 4°C	T = 10°C	T = 14°C	T = 22°C	T = 4°C	T = 10°C	T = 14°C	T = 22°C
ICQF	A	A	A	A	A	A	A	F
ICMF	A	A	A	A	A	A	A	M

* Essais de flottation d'une durée de 48 h à 22°C avec le polymère Zetag 7654 (1 g L^{-1}) à 13% v v^{-1}.

Les résultats indiquent qu'aucune flottation n'est possible en dessous de 18°C. Seuls les cônes placés à 22°C ont permis d'obtenir un résultat. Cependant, pour cet essai et les suivants, la température de 18°C ne sera plus prise en compte, car les conditions pour l'obtenir au laboratoire ne sont pas idéales, et les résultats risqueraient d'être faussés. En effet, cette température ne reste pas stable dans le temps (comprise environ entre 18 et 20°C). Là encore aucun résultat n'est obtenu sans apport de polymère : aucune flottation biologique naturelle non assistée n'est envisageable.

Même à 22°C, la flottation ne donne pas de résultats concluants. En effet, les flocs obtenus sont très petits (1) et la flottation est faible (3). On n'a pas observé de différence de phase entre le surnageant et la fraction solide (0).

Pour ce test, seuls les essais à 14 et 22°C ont été analysés, afin de comparer un essai donnant des résultats satisfaisants à un essai où la flottation n'a pas eu lieu (Tableau 3.25).

Tableau 3.25 Effet de la température lors des essais B-TEM*

Paramètres	Unités	Lisier brut	Témoin sans polymère		Essais B-TEM	
			T = 14°C	T = 22°C	T = 14°C	T = 22°C
ST	g L^{-1}	34,5±0,7	19,4±0,6	19,6±1,5	18,5±0,8	22,9±1,2
	% enl.		*43,7*	*43,1*	*46,3*	*33,7*
MES	g L^{-1}	8,07±1,43	4,43±0,86	5,42±1,04	5,60±0,53	5,87±0,49
	% enl.		*45,0*	*32,9*	*30,6*	*27,3*
pH	-	7,95	8,20	8,32	8,03	8,21
POR	mV	-117	-104	-94,1	-110	-105
Siccité (FS)	%		6,40	6,00	6,30	5,30
N-NTK	mg L^{-1}	2060	1670	1330	1190	1130
	% enl.		*18,9*	*35,4*	*42,2*	*45,2*
$N\text{-}NH_4$	mg L^{-1}	155±7	169±19	278±19	138±12	326±12
	% enl.		*-9,00*	*-79,4***	*10,9*	*-110***
N-org	mg L^{-1}	1905	1501	1052	1052	804
	% enl.		*21,2*	*44,8*	*44,8*	*57,8*
P_{tot}	mg L^{-1}	279±3	107±3	125±8	78,9±9,7	126±22
	% enl.		*61,4*	*55,2*	*71,7*	*54,9*
$P\text{-}PO_4$	mg L^{-1}	53,2±19,0	27,0±2,9	39,2±9,4	25,3±7,9	43,6±10,4
	% enl.		*49,3*	*26,3*	*52,4*	*18,1*
P-org	mg L^{-1}	226±22	80,0±5,8	85,8±17,4	53,6±17,6	82,4±31,9
	% enl.		*64,6*	*62,0*	*76,3*	*63,5*
$N\text{-}NH_4/P_{tot}$	-	0,56	1,57	2,23	1,75	2,60

* Essais de flottation d'une durée de 48 h avec le polymère Zetag 7654 (1 g L^{-1}) à 13% v v^{-1}.

** Valurs incohérentes : Il n'est pas possible d'expliquer cette augmentation importante de la teneur en $N\text{-}NH_4$.

Ces résultats indiquent un pourcentage d'enlèvement des MES faible, quelque soit la température de l'essai, même à 22°C. Il semble donc que malgré des conditions similaires aux précédents essais, les tests soient peu reproductibles pour ce lisier de vache-génisse. La concentration la plus basse en MES est obtenue à 14°C sans polymère. Ce témoin a décanté et, contrairement aux essais antérieurs, la flottation a donné de moins bons résultats que la décantation. Dans tous les cas, l'enlèvement des MES n'est pas suffisant (> 3 g L^{-1}), et toutes les teneurs finales sont beaucoup trop élevées (comprises entre 4,43±0,86 et 5,87±0,49 g L^{-1}). Il est donc possible que les caractéristiques du lisier brut aient évolué au cours du temps.

La siccité de la FS est proche de 6% pour tous les cônes à l'essai. Cette valeur est nettement inférieure à la valeur cible de 10%. Ceci vient confirmer que la flottation était incomplète.

Le rapport $N\text{-}NH_4/P_{tot}$ est également très faible, même pour les tests réussis. Ce faible rapport peut s'expliquer par la quantité de matière en suspension encore présentes dans la fraction liquide. En effet, la teneur en P_{tot} est encore importante dans la fraction liquide. Les formes du phosphore fixées aux MES ne sont pas passées dans la fraction solide contrairement aux tests précédents, puisque la teneur en MES est encore élevée dans la fraction liquide. De plus, la composition du lisier brut a changé et la teneur en $N\text{-}NH_4$ est beaucoup moins élevée que pour les lisiers des essais précédents (155±7 mg L^{-1}). Cependant, comme les tests sont relativement longs et que la quantité de N-NTK est élevée dans le lisier brut, il est possible que les variations importantes de la teneur en $N\text{-}NH_4$ soient dues à une formation d'azote ammoniacale au cours du procédé (réaction d'ammonification, Equation 1.4) par la biomasse du lisier (Ni, 1999).

L'enlèvement des phosphates dans la fraction liquide est particulièrement important à 22°C. On peut supposer que le phosphore inorganique en solution, qui constitue une forme assez instable du phosphore, ait été assimilé par la biomasse microbienne pour former du phosphore organique comme lors de la déphosphatation biologique des eaux usées (Blais, 2006), ce qui expliquerait également la faible diminution du P_{tot}. Cependant, ce phénomène nécessite une phase d'anaérobiose suivie d'une phase d'aérobiose. Le phosphore inorganique a également pu former des liaisons pour former du phosphore inorganique particulaire (Massé *et al.*, 2006)., qui se retrouvait dans la FS.

Même si la concentration en N-NTK diminue, elle est élevée par rapport à l'ammonium. Ceci confirme que ce lisier contient plus de N-org que précédemment, et que le lisier de veau (A).

Finalement, comme pour le lisier de veau (A), les tests sont réalisés à la température ambiante du laboratoire. On pourra aussi vérifier, grâce au test B-AGE, si le temps pour obtenir une flottation complète est trop long pour permettre l'utilisation de ce lisier pour la flottation biologique.

3.2.4 Tests de vieillissement du lisier (B-AGE)

Comme précédemment, les tests pour le vieillissement du lisier ont été réalisés avec le polymère Zetag 7654 à 13% v v^{-1}, sans tamisage et à 22°C. Le lisier brut a également été dilué de 1/1,5 (Tableau 3.27). Cet essai a été réalisé avec un lisier âgé de 7 et 27 jours, après 48 h de flottation.

Comme on le constate en comparant les lisiers bruts des différents tests, la teneur en MES du lisier augmente avec le vieillissemente de celui-ci. Nous pouvons comparer ce phénomène à celui se déroulant naturellement dans les boues de station d'épuration. Il s'agit d'un processus d'épaississement naturel (Blais, 2006). Le test à 27 jours a été fait avec un lisier trop concentré en solides totaux. Il faudra en tenir compte dans les résultats de la flottation.

Ces essais ont été réalisés en duplicata pour les 2 vieillissements (7 et 27 jours). Exception faite des essais sans polymère (témoins), tous les tests ont fonctionné. Le vieillissement du lisier de vache-génisse (B) n'influence donc pas la flottation (au moins jusqu'à 27 jours, le vieillissement testé le plus élevé).

Le Tableau 3.26 montre que les indices ICQF et ICMF sont semblables pour les essais avec le lisier âgé de 7 et 27 jours.

Tableau 3.26 Valeurs des indices ICQF et ICMF obtenues lors des essais B-AGE*

Paramètres	Témoin sans polymère		Essais B-AGE			
	Φ = 7 jrs	Φ = 27 jrs	Φ 7 jrs		Φ = 27 jrs	
ICQF	A	A	M	M	M	M
ICMF	A	A	M	M	M	M

* Essais de flottation d'une durée de 48 h à 22°C avec le polymère Zetag 7654 (1 g L^{-1}) à 13% v v^{-1}.

D'après les résultats des indices ICMF et ICQF, même si la flottation n'atteint pas la cote maximale (B), elle est possible. Par contre, sans polymère, il n'est de nouveau pas possible d'observer la moindre flottation de solides.

Tableau 3.27 Effet du vieillissement du lisier lors des essais B-AGE*

Paramètres	Unités	Lisiers bruts		Témoin sans polymère		Essais B-AGE			
		Φ = 7 jrs	Φ = 27 jrs	Φ = 7 jrs	Φ = 27 jrs	Φ = 7 jrs		Φ = 27 jrs	
ST	g L^{-1}	35,8±2,7	56,1±2,1	25,0±3,7	44,6±2,0	14,1±0,75	13,8±0,19	23,4±0,59	23,7±0,16
	% enl.			*30,3*	*20,6*	*60,6*	*61,4*	*58,4*	*57,8*
MES	g L^{-1}	11,7±1,5	17,9±0,3	9,88±3,19	14,8±2,1	2,91±0,85	2,57±0,72	2,80±0,37	4,51±0,91
	% enl.			*15,8*	*17,5*	*75,2*	*78,1*	*84,4*	*74,9*
pH	-	8,31	7,30	7,42	7.67	7,38	7,48	7,48	7,70
POR	mV	-192	-233	-184	-201	-190	-194	-218	-215
Siccité (FS)	%	-	-	8,30	10,3	11,1	9,90	10,6	10,3
N-NTK	mg L^{-1}	1600	1940	1360	1650	1070	1030	1540	1650
	% enl.			*15,0*	*14,7*	*33,1*	*35,6*	*20,6*	*15,0*
$N\text{-}NH_4$	mg L^{-1}	447±49	913±55	440±34	418±36	369±34	409±31	487±30	695±27
	% enl.			*1,60*	*54,3*	*17,3*	*8,4*	*46,7*	*23,9*
N-org	mg L^{-1}	1153	1027	920	1232**	701	621	1053	955
	% enl.			*20,2*	*-20,0***	*39,2*	*46,1*	*-2,53*	*7,01*
P_{tot}	mg L^{-1}	363±13	439±45	199±49	386±44	109±5	105±5	144±17	120±52
	% enl.			*45,2*	*12,1*	*70,0*	*71,1*	*67,1*	*72,7*
$P\text{-}PO_4$	mg L^{-1}	142±26	156±9	88,7±12,2	169±31**	45,0±12,0	45,4±4,6	29,9±10,2	43,1±16,2
	% enl.			*37,5*	*- 8,30***	*68,3*	*68,0*	*80,9*	*72,4*
P-org	mg L^{-1}	221±39	283±54	110±62	217±74	64,0±16,9	59,6±10,1	114±28	76,9±68,1
	% enl.			*50,1*	*23,3*	*71,0*	*73,0*	*59,7*	*72,8*
$N\text{-}NH_4/P_{tot}$	-	1,23	2,08	2,21	1,08	3,39	3,90	3,37	5,80

* Essais de flottation d'une durée de 48 h à 22°C avec le polymère Zetag 7654 (1 g L^{-1}) à 13% v v^{-1}.

** Valeur incohérente : Cette concentration est beaucoup plus élevée que les pour les autres essais.

L'enlèvement des MES est efficace pour les lisiers âgés de 7 et 27 jours, et satisfait au critère de 3 g L^{-1} (Tableau 3.27), exception faite d'un essai de 27 jours (4,51±0,91 g L^{-1}), mais comme précisé au départ, le lisier brut de 27 jours est plus concentré en ST au début du test. De plus, cet essai permet de nouveau d'observer que l'enlèvement des MES est beaucoup moins efficace lorsqu'on obtient deux fractions séparées par décantation plutôt que par flottation, puisque les taux d'enlèvement pour les témoins sont très faibles (inférieurs à 20%). On constate de nouveau l'action de la masse solide comme agent filtrant de la fraction liquide, et la flottation naturelle n'ezst en aucun cas suffisante : l'apport d'un polymère est obligatoire dans ce mode de séparation.

Pour ce test, la flottation semble être complète, car la siccité de la FS est supérieure à 10%, ce qui est conforme à l'objectif de performance fixé au départ.

Par contre, les rapports $N\text{-}NH_4/P_{tot}$ sont très faibles, quelque soit l'essai, même s'ils sont meilleurs pour les lisiers flottés (3,37-5,80) par rapport aux lisiers décantés (témoins : 1,08-2,21). L'enlèvement du phosphore étant relativement efficace (supérieur à 65%), le problème serait plutôt la faible teneur en $N\text{-}NH_4^+$ finale. Une partie de cette forme d'azote n'est plus présente dans la fraction liquide à la fin de l'essai. Cependant, le problème vient surtout du fait d'une teneur en $N\text{-}NH_4$ faible dans le lisier brut de départ. En effet, comparativement au lisier de porc, la teneur initial en azote (N-NTK) du lisier bovin est plutôt faible (section 1.2.6). La forme ammoniacale est nettement prédominante dans le lisier de porc, tandis que pour le lisier de bovin, cette teneur est plus variable car la forme N-org beaucoup plus présente.

L'enlèvement des phosphates est également efficace (supérieur à 65%), particulièrement pour les lisiers flottés. Les phosphates en solution se sont soit liés pour donner du phosphore inorganique particulaire (Massé *et al.*, 2006), soit ils ont été assimilés par la flore microbienne et convertis en phosphore organique (Blais, 2006). Quel que soit la ou les réactions en jeu, une partie du phosphate qui était dans la fraction liquide a été éliminée par l'enlèvement des ST, suite à une adsorption ou assimilation à la fraction solide.

Le taux de N-NTK diminue, mais faiblement, dû probablement à la perte d'ammonium au cours de la flottation et à la diminution de l'azote fixé (enlèvement de ST).

En conclusion, quelque soit le vieillissement du lisier de vache-génisse (B), la flottation fonctionne et les résultats obtenus varient peu entre 7 et 27 jours de vieillissement.

3.2.5 Tests de durée de flottation (B-FLO)

Cet essai a été réalisé avec le polymère Zetag 7654 à 13% v v^{-1}, sur du lisier non tamisé dilué à 1/1,5 et à température ambiante (environ 22°C).

L'échantillonnage a été réalisé après 11, 27, 34 et 48 h de flottation. Ces essais indiquent que la flottation du lisier de vache laitière-génisse est plus lente que celle du lisier de veau. Les résultats obtenus sont présentés au Tableau 3.29.

Tableau 3.28 Valeurs des indices ICQF et ICMF obtenues lors des essais B-FLO*

Paramètres	Témoin sans polymère	Essais B-FLO			
	t = 48 h	t = 11 h	t = 27 h	t = 34 h	t = 48 h
ICQF	A	A	M	M	M
ICMF	A	A	M	M	M

* Essais de flottation à 22°C avec le polymère Zetag 7654 (1 g L^{-1}) à 13% v v^{-1}.

Les indices donnent des résultats identiques. Aucune flottation n'a lieu après 11 h d'essai. Cependant, on obtient un résultat satisfaisant puisque la flottation se produit en moins de 27 h. Les tests ont été arrêtés à 48 h, sans évolution notable. Là encore, le témoin prouve qu'il est impossible, après 48h d'essai, d'obtenir une flottation naturelle non assistée.

Aucun échantillonnage n'a été réalisé pour le lisier après 11 h de flottation. En effet, le prélèvement était impossible, car les deux phases étaient entièrement mélangées.

Tableau 3.29 Effet de la durée de flottation lors des essais B-FLO*

Paramètres	Unités	Lisier brut	Témoin sans polymère	Essais B-FLO		
			t = 48 h	t = 27 h	t = 34 h	t = 48 h
ST	g L^{-1}	39,3±1,9	26,6±0,2	26,1±4,3	18,5±0,4	22,0±0,4
	% enl.		*32,3*	*33,4*	*53,0*	*44,1*
MES	g L^{-1}	27,0±18,2	5,82±0,33	5,45±0,61	3,52±0,65	5,81±1,59
	% enl.		*78,4*	*79,8*	*87,0*	*78,5*
pH	-	7,28	7,43	7,50	7,48	7,91
POR	mV	-409	-332	-321	-340	-353
Siccité (FS)	%		6,40	6,40	7,30	7,60
N-NTK	mg L^{-1}	1650	1290	943	1100	1210
	% enl.		*21,8*	*42,9*	*33,3*	*26,7*
$N\text{-}NH_4$	mg L^{-1}	731±54	748±46	575±53	570±32	601±90
	% enl.		*-2,30*	*21,2*	*21,9*	*17,7*
N-org	mg L^{-1}	919	542	368	530	609
	% enl.		*41,0*	*60,0*	*42,3*	*33,7*
P_{tot}	mg L^{-1}	320±12	227±7	164±2	157±44	150±4
	% enl.		*29,7*	*48,7*	*50,8*	*53,0*
$P\text{-}PO_4$	mg L^{-1}	144±47	113±15	58,5±23,5	49,5±14,9	71,6±36,4
	% enl.		*21,4*	*59,4*	*65,7*	*50,4*
P-org	mg L^{-1}	176±59	114±22	106±25	108±59	78,4±40,2
	% enl.		*35,2*	*39,8*	*38,6*	*55,5*
$N\text{-}NH_4/P_{tot}$	-	2,28	3,30	3,51	3,63	4,00

* Essais de flottation à 22°C avec le polymère Zetag 7654 (1 g L^{-1}) à 13% v v^{-1}.

Le pH varie peu et est toujours compris entre 7 et 8. Le POR est également stable au cours de la flottation, malgré une légère diminution (en comparaison au lisier brut) et inférieur à -300 mV, ce qui signifie que le lisier vache-génisse (B) est un milieu très réducteur.

L'enlèvement des MES est efficace pour tous les essais échantillonnés (supérieur à 75%), mais insuffisant pour atteindre 3 g L^{-1}.

La siccité de la FS, par contre, est faible, et n'atteint pas 10%. Sous cette forme, la fraction solide ne pourra être utilisée avant déshydratation.

Par contre, bien que l'enlèvement du P_{tot} dans la fraction liquide soit efficace pour les lisiers flottés, le rapport $N\text{-}NH_4/P_{tot}$ reste très inférieur à 7. Ceci confirme le fait que la teneur en N-NH4 dans le lisier de vache-génisse brut est nettement moindre en comparaison avec celle du lisier de porc. Pour cette raison, il serait nécessaire de redéfinir, pour ce type de lisier, une valeur cible plus appropriée.

Toutes les concentrations en N-NTK ont également diminué, ce qui correspond à la diminution de la concentration en ammonium (entre 26,7 et 42,9% d'enlèvement pour les essais ayant flottés).

L'enlèvement du $P\text{-}PO_4$ dans la fraction liquide des lisiers flottés est toujours supérieur à 50%, et là encore, on ne peut que supposer que les phosphates en solution se sont liés pour donner du phosphore inorganique particulaire (Massé *et al.*, 2006), ou qu'ils ont été assimilés par la flore microbienne et convertis en phosphore organique (Blais, 2006).

3.2.6 Conclusion pour la flottation du lisier de vache-génisse (B)

En final, la flottation du lisier de vache-génisse (B) à température ambiante (22°C) nécessite un temps plus long de contact polymère/lisier que celle du lisier de veau (A) (environ 27 h). Cette donnée reste à vérifier avec d'autres lisiers de vache-génisse. Le polymère employé est le Zetag 7654, un cationique fort, à 13% v v^{-1}. Le tamisage, comme pour le lisier de veau, empêche la flottation, et n'est donc pas recommandé. Il sera intéressant, pour les lisiers suivants, de tester un tamisage encore plus grossier, enlevant seulement les très grosses particules de litière. Par contre,

contrairement au lisier de veau, la dilution du lisier brut est essentielle à la flottation. En effet, un lisier trop concentré empêche la formation de flocs. La teneur en ST avant l'expérience ne doit pas être supérieure à 4% environ. Même après un vieillissement de 27 jours, la flottation a toujours lieu, contrairement au comportement du lisier de veau (A). Cependant, l'enlèvement des MES de la fraction liquide est peu satisfaisant. Le phénomène naturel représenté par les témoins ne permmettent pas de faire flotter les solides, et donc aucune flottation naturelle n'est possible sans l'aide d'un polymère. Là encore, on observe souvent, comme pour le lisier A, trois phases lors des essais ayant fonctionné. Mais les paramètres sélectionnés après chaque étape (pourcentage de polymère, tamisage, etc.) tenant compte de cette quantité de solides décantés (indice ICQF), les tests choisis avaient un dépôt faible (Annexe E) par rapport à la quantité de solides flottés.

3.3 Lisier vache-génisse (C)

3.3.1 Tests de polymères (C-POL)

Ces tests sont de nouveau réalisés en trois phases. Suite aux résultats obtenus précédemment (lisier de veau (A) et vache-génisse (B)), les mêmes polymères que pour le lisier de veau ont été préparés, en ajoutant à la liste le polymère Zetag 7654. De plus, le lisier brut a directement été dilué pour le test, après analyse de ses caractéristiques principales. En effet, sa teneur en ST de départ étant de 63,9±5,5 g L^{-1}, la flottation n'aurait pas fonctionné. Le lisier pour le test C-POL-1 a donc été dilué à une concentration d'environ 31,0±0,4 g L^{-1} de ST (1/2).

À cette concentration, deux polymères (Zetag 7689 et Zetag 7654) ont permis d'obtenir des flocs lors du test C-POL-1. Cependant, même dans ce cas, les floc formés sont plutôt instables et petits (2), la séparation en bécher n'est pas visuelle (0) et le surnageant, comme précédemment, reste opaque (0).

Les tests C-POL-2 et 3 ont donc été effectués avec les polymères Zetag 7689 et Zetag 7654. Le lisier brut a été dilué selon les facteurs exposés au Tableau 3.30. Les lisiers bruts du test POL possédaient les caractéristiques moyennes décrites au Tableau 3.31.

Tableau 3.30 Dilutions du lisier brut C lors des essais C-POL-2 et C-POL-3

Noms de l'essai	Dilutions du lisier brut
C-POL-2	1/2
C-POL-3	1/2,5

Tableau 3.31 Caractéristiques des lisiers bruts lors des essais C-POL

Paramètres	Unités	Essais C-POL-2	Essais C-POL-3
ST	$g\ L^{-1}$	30,1±0,4	26,8±0,4
MES	$g\ L^{-1}$	6,96±1,97	9,18±1,58
pH	-	7,51	7,64
POR	mV	-347	-342
N-NTK	$mg\ L^{-1}$	928	915
$N\text{-}NH_4$	$mg\ L^{-1}$	696±21	701±60
N-org	$mg\ L^{-1}$	232	214
P_{tot}	$mg\ L^{-1}$	274±11	220±22
$P\text{-}PO_4$	$mg\ L^{-1}$	97,5±16,5	97,0±20,0
P-org	$mg\ L^{-1}$	177±27	123±42
$N\text{-}NH_4/P_{tot}$	-	2,53	3,19

Quelque soit le polymère employé ou sa concentration, le test POL ne donne aucun résultat probant. Comme les tests POL réalisés avec les lisiers précédents fonctionnaient, le problème serait le lisier brut. Différentes hypothèses ont été émises. En premier lieu, le lisier a été prélevé dans la fosse extérieure. Or, cette fosse contenait du lisier assez âgé, puisque l'épandage n'avait pas encore eu lieu. De plus, les conditions d'échantillonnage n'étaient pas idéales, car le lisier contenu dans la fosse de stockage n'est pas homogène. Il est donc probable que l'échantillon de lisier prélevé ne soit pas représentatif et ne possède pas les caractéristiques d'un lisier brut adéquat pour la flottation.

Les tests pour ce lisier ont donc été arrêtés à ce stade. Cependant, comme l'élevage de M. Hudon présentait des conditions idéales pour des essais de flottation biologique, un nouvel échantillonnage a été réalisé dans de meilleures conditions.

3.4 Lisier de vache-génisse (D)

3.4.1 Tests de polymères (D-POL)

Le test de départ a été réalisé avec les mêmes polymères que ceux utilisés pour traiter le lisier de vache-génisse C, et le lisier initial a été dilué à 1/4 (concentration de 21,3±1,8 g L^{-1}). Les résultats de ce test indiquent que le polymère cationique Zetag 7654 est efficace pour obtenir des flocs. Mais cette fois, un polymère d'une autre catégorie permet également de floculer le lisier. Il s'agit du Percol 765, un polymère neutre. Les flocs obtenus sont gros (4) dans les deux cas, par contre, il est impossible de distinguer une séparation de phases dans le bécher.

Afin de tester D-POL-2, le lisier brut a été dilué d'environ 1/2 (Tableaux 3.33 et 3.34), car sa concentration initiale en ST était de 81,1±3,9 g L^{-1}, ce qui, comme nous l'avons vu pour les lisiers vache-génisse, ne permet pas la flottation du lisier. Le test D-POL-2 a été réalisé avec les polymères Zetag 7654 et Percol 765.

Cet essai indique que plusieurs concentrations de polymères permettent d'obtenir une flottation après 68 h d'essai. Les résultats des indices ICQF et ICMF sont montrés au Tableau 3.32.

Tableau 3.32 Valeurs des indices ICQF et ICMF obtenues lors des essais D-POL-2*

Paramètres	Témoin sans polymère	Essais D-POL-2					Essais D-POL-2				
		Conc. Zetag 7654 (% v v^{-1})					Conc. Percol 765 (% v v^{-1})				
		5	10	13	17	20	5	10	13	17	20
ICQF	A	A	M	A	M	M	A	M	M	M	M
ICMF	A	A	F	A	M	M	A	F	M	M	M

* Essais de flottation d'une durée de 68 h à 22°C.

Pour cet essai, plusieurs concentrations donnent des résultats similaires. De plus, les deux indices concordent. L'ajout de polymère est efficace pour améliorer la séparation. La flottation commence dans les deux cas à 10% v v^{-1} de polymère. Cependant, il faut noter que pour 10% v v^{-1}, la

séparation liquide-solide n'est pas complète. De plus, pour le polymère Zetag 7654, les flocs sont instables (il était impossible d'échantillonner ce test, car les deux phases se mélangent), ce qui peut expliquer le fait que la flottation n'a pas lieu à 13% v v^{-1}. Pour le polymère Zetag 7654, les flocs obtenus sont, à 17% v v^{-1}, de taille moyenne (3), et la flottation est moyenne (4), tandis que pour la même concentration de Percol 765, on obtient de gros flocs (4), et une excellente flottation (5). Les indices obtenus ne reflètent que partiellement ces résultats, car comme pour les lisiers de vache-génisse précédents, il est impossible d'estimer la qualité du surnageant et de lui attribuer un indice. Il est toujours considéré égal à 0 (opaque), même s'il est possible d'observer la séparation et de noter un enlèvement de ST et de MES. Comme pour les lisiers précedents ayant donnés des résultats de flottation positive (A et B), aucune flottation ne se fait sans ajout de polymère.

Tableau 3.33 Effet de la concentration du polymère Zetag 7654 lors des essais D-POL-2*

Paramètres	Unités	Lisier brut	Témoin sans polymère	Conc. Zetag 7654 (% v v^{-1})			
				5	13	17	20
ST	g L^{-1}	35,3±2,9	17,1±0,1	15,4±0,2	14,7±0,1	15,3±0,1	12,5±0,27
	% enl.		*51,6*	*56,5*	*58,3*	*56,8*	*64,7*
MES	g L^{-1}	15,4±5,7	3,24±0,29	2,73±0,15	2,70±0,21	2,68±0,79	1,95±0,47
	% enl.		*79,0*	*82,3*	*82,5*	*82,6*	*87,4*
pH	-	7,42	7,63	7,78	7,77	7,21	7,26
POR	mV	-341	-354	-372	-360	-351	-364
Siccité (FS)	%		8,4	6,9	6,0	6,3	6,5
N-NTK	mg L^{-1}	1780	1380	1320	597	598	463
	% enl.		*22,5*	*25,8*	*66,5*	*66,4*	*74,0*
$N\text{-}NH_4$	mg L^{-1}	600±58	584±30	540±31	309±44	506±73	413±35
	% enl.		*2,61*	*9,89*	*48,5*	*15,6*	*31,2*
N-org	mg L^{-1}	1180	796	780	288	92	50
	% enl.		*32,5*	*33,9*	*75,6*	*92,2*	*95,8*
P_{tot}	mg L^{-1}	327±7	238±4	210±1	196±7	196±4	159±2,0
	% enl.		*27,3*	*36,0*	*40,3*	*40,2*	*51,5*
$P\text{-}PO_4$	mg L^{-1}	52,8±6,1	43,4±4,5	38,6±5,4	34,9±9,0	37,3±5,5	31,7±2,0
	% enl.		*17,8*	*26,9*	*33,8*	*29,4*	*40,0*
P-org	mg L^{-1}	274±13	195±9	171±6	161±16	159±10	127±4
	% enl.		*28,8*	*37,6*	*41,2*	*42,0*	*53,6*
$N\text{-}NH_4/P_{tot}$	-	1,83	2,45	2,58	1,58	2,59	2,60

* Essais de flottation d'une durée de 68 h à 22°C.

Tableau 3.34 Effet de la concentration du polymère Percol 765 lors des essais D-POL-2*

Paramètres	Unités	Lisier brut	Témoin sans polymère	Conc. Percol 765 (% v v^{-1})				
				5	10	13	17	20
ST	g L^{-1}	39,3±2,3	16,0±0,3	16,1±1,9	13,3±0,2	11,4±0,6	11,1±0,4	9,30±0,21
	% enl.		*59,3*	*59,0*	*66,3*	*71,0*	*71,7*	*76,5*
MES	g L^{-1}	11,7±0,9	3,50±0,46	3,20±0,46	2,39±0,48	1,35±0,33	2,30±0,89	1,26±0,28
	% enl.		*70,2*	*72,8*	*79,6*	*88,5*	*80,4*	*89,2*
pH	-	7,40	7,27	7,55	7,17	7,26	7,17	7,18
POR	mV	-333	-379	-377	-316	-302	-344	-338
Siccité (FS)	%		7,8	6,9	6,8	7,4	7,6	6,7
N-NTK	mg L^{-1}	2150	1250	1090	1120	1030	1070	923
	% enl.		*41,9*	*49,3*	*47,9*	*52,1*	*50,2*	*57,1*
$N\text{-}NH_4$	mg L^{-1}	606±59	630±104	487±36	576±50	524±24	584±50	514±17
	% enl.		*- 4,0*	*19,7*	*5,0*	*13,6*	*3,6*	*15,2*
N-org	mg L^{-1}	1544	620	603	544	506	486	409
	% enl.		*59,8*	*60,9*	*64,8*	*67,2*	*68,5*	*73,5*
P_{tot}	mg L^{-1}	324±15	236±9	186±6	129±17	119±8	104±9	85,6±1,0
	% enl.		*27,2*	*42,6*	*60,3*	*63,2*	*67,8*	*73,6*
$P\text{-}PO_4$	mg L^{-1}	90,6±22,4	44,1±5,2	40,8±9,1	34,6±5,9	18,3±1,8	15,0±2,2	17,9±8,2
	% enl.		*51,3*	*55,0*	*61,8*	*79,8*	*83,5*	*80,3*
P-org	mg L^{-1}	233±37	192±14	145±15	94,4±22,5	101±10	89,0±11,4	67,7±9,2
	% enl.		*17,6*	*37,8*	*59,5*	*56,7*	*61,8*	*70,9*
$N\text{-}NH_4/P_{tot}$	-	1,87	2,67	2,62	4,47	4,39	5,60	6,00

* Essais de flottation d'une durée de 68 h à 22°C.

L'enlèvement des MES des essais B-POL-2 est efficace (> 70%) pour tous les tests, et les teneurs sont inférieures à 3 g L^{-1}, en dehors des témoins (3,24±0,29 g L^{-1} pour Zetag 7654 et 3,50±0,46 g L^{-1} pour Percol 765) et de l'essai à 5% v v^{-1} de Percol 765 (3,20±0,46 g L^{-1}). L'ajout de polymère en quantité suffisante est nécessaire pour un enlèvement efficace des MES, la phénomène naturelle en cours dans le lisier (décantation) est insuffisant. Cependant, on peut noter que les tests réalisés avec Percol 765 semblent donner de meilleurs résultats pour des concentrations en polymère identiques.

Les teneurs en ST des FS n'atteignent jamais 10% (toutes comprises entre 6 et 8,5%). Sous cette forme, cette fraction solide ne pourra être exportée.

Le rapport $N\text{-}NH_4/P_{tot}$ est très faible, particulièrement pour le polymère Zetag 7654 (aucun indice supérieur à 2,6). Par contre, il est près de 7 pour les concentrations en Percol 765 de 17 et 20% v v^{-1} (respectivement 5,6 et 6,0). Les taux d'enlèvement du P_{tot} étant tous élevés (particulièrement pour les tests flottés : entre 40,2 et 73,6% d'enlèvement), les valeurs basses du rapport $N\text{-}NH_4/P_{tot}$ sont essentiellement causées par l'enlèvement partiel de l'ammonium pour les tests avec le polymère Zetag 7654 (les teneurs de départ étant équivalentes pour les deux lisiers bruts).

La concentration en $P\text{-}PO_4$ a également fortement diminué, particulièrement lorsque la flottation a réussi. Les formes dissoutes de P sont donc moins présentes dans la fraction liquide une fois la flottation réalisée.

La concentration en N-NTK diminue fortement. D'après la différence entre N-NTK et $N\text{-}NH_4$, c'est la diminution de la concentration en $N\text{-}NH_4$ qui en est la cause.

Les résultats du témoin (décantation) sont similaires à ceux des autres essais, exception faite de l'enlèvement du P_{tot} qui est seulement de 27,2% (comparativement aux essais flottés). Ce phénomène d'enlèvement du P_{tot} étant essentiel dans le contexte de LISOX, il n'est pas envisageable de ne pas utiliser de polymère, qui s'avère essentiel à la séparation S/L.

Ces résultats indiquent que le polymère le plus intéressant à utiliser pour la suite des essais est le Percol 765. Le test D-POL-3 a donc été réalisé avec ce polymère. Le lisier brut possède les mêmes caractéristiques que celui du test D-POL-2 pour ce polymère.

Aucune flottation n'a eu lieu pour 2% v v^{-1} de polymère (résultats non montrés). Par contre, la flottation fonctionne pour 4% v v^{-1}. Cependant, il est impossible d'échantillonner cet essai, car les flocs formés (de taille moyenne, 3) sont très instables. Les indices ICQF et ICMF ainsi que l'analyse du lisier n'ont pu être réalisé. Il n'est donc pas possible de conclure quant à l'utilisation de ce polymère, lorsqu'il est préparé à 5 g L^{-1}.

Pour la suite des essais, la concentration la plus basse de Percol 765 à 1 g L^{-1}, soit 17% v v^{-1}, a été retenue donnant de bons résultats, même si 20% v v^{-1} donnait de meilleurs résultats. Une telle concentration entraînerait une plus forte consommation de polymère, alors que les résultats pour 17% v v^{-1} sont satisfaisants (rapport $N\text{-}NH_4/P_{tot}$ proche de 7, enlèvement du P_{tot} de 67,8%, concentration en MES < 3 g L^{-1}).

3.4.2 Tests de tamisage et de dilution du lisier (D-TAM)

Ce test a donc été réalisé avec le polymère Percol 765 à 17% v v^{-1}. Les tests ont duré 68 h, comme pour l'essai D-POL. Suite aux résultats obtenus avec le lisier vache-génisse (B), on a privilégié des grosseurs de maille plus larges, soit 3 et 8 mm. Le tamisage à 3 mm permettra de connaître l'effet d'un tamisage fin sur la flottation du lisier vache-génisse (D), tandis que l'ouverture à 8 mm mettra en évidence le résultat d'un dégrossissement et d'un enlèvement des grosses particules uniquement.

Le lisier brut a été dilué, comme pour les autres lisiers. Les facteurs de dilution sont montrés au Tableau 3.35. Comme précédemment, tous les lisiers bruts ont été analysés avant l'essai afin d'observer un potentiel effet du tamisage sur les caractéristiques de départ du lisier vache-génisse (D) (Tableau 3.36).

Tableau 3.35 Dilutions du lisier brut D lors des essais D-TAM

Noms lisiers bruts NT du test D-TAM	Dilutions
D1	1/3,5
D2	1/2

Tableau 3.36 Caractéristiques des lisiers bruts lors des essais D-TAM

Paramètres	Unités	Lisier D1			Lisier D2		
		NT	T3	T8	NT	T3	T8
ST	$g\ L^{-1}$	23,4±0,5	27,3±0,8	19,0±0,1	39,3±2,3	37,9±0,4	38,9±1,3
MES	$g\ L^{-1}$	6,01±1,15	6,96±0,19	2,67±0,47	26,9±5,8	23,3±1,2	11,3±1,6
pH	-	7,38	7,42	7,37	7,33	7,59	7,41
POR	mV	-375	-375	-373	-375	-381	-383
N-NTK	$mg\ L^{-1}$	1670	1010	1870	1100	1730	2090
$N\text{-}NH_4$	$mg\ L^{-1}$	665±40	724±81	527±24	387±48	390±39	392±29
N-org	$mg\ L^{-1}$	1005	286*	1343	713*	1340	1698
P_{tot}	$mg\ L^{-1}$	203±12	354±14	186±21	315±17	503±48	405±22
$P\text{-}PO_4$	$mg\ L^{-1}$	55,4±9,6	87,6±32,2	46,0±7,7	102±22	105±19	84,0±7,8
P-org	$mg\ L^{-1}$	148±22	266±46	140±28	213±39	398±67	321±30
$N\text{-}NH_4/P_{tot}$	-	3,28	2,05	2,83	1,23	0,78	0,97

* Valeur incohérente : Concentration en N-NTK trop basse, il n'est pas possible d'expliquer ces incohérences.

Comme pour les lisiers précédents, le tamisage et la teneur initiale en ST influencent les caractéristiques du lisier brut. La teneur en MES est plus élevée quand la teneur en ST de départ est plus élevée. De même, le rapport $N\text{-}NH_4/P_{tot}$ est plus faible pour le lisier le plus concentré en ST, car la concentration en P_{tot} est dans ce cas plus élevée (P fixé) et la teneur en $N\text{-}NH_4$ plus faible.

Suite à cet essai, il apparaît que le tamisage du lisier du vache-génisse (D) donne des résultats similaires aux lisiers précédents. En effet, le tamisage trop fin empêche une formation de gros flocs et donc la flottation (Tableau 3.37).

Tableau 3.37 Valeurs des indices ICQF et ICMF obtenues lors des essais D-TAM*

Paramètres	Essais D-TAM					
	Lisier D1			Lisier D2		
	NT	T3	T8	NT	T3	T8
ICQF	M	A	M	M	A	M
ICMF	F	A	F	M	A	F

* Essais de flottation d'une durée de 68 h à 22°C avec le polymère Percol 765 (1 g L^{-1}) à 17% v v^{-1}.

Les indices qualitatifs et quantitatifs donnent des résultats presque similaires. Comme pour les lisiers antérieurs, un tamisage trop fin (ici, 3 mm) ne donne aucune flottation. Par contre, on obtient des résultats comparables pour le lisier tamisé à 8 mm et le non tamisé. L'essai le plus concluant par rapport aux indices ICQF et ICMF est le D2-NT.

L'effet du tamisage sur la flottation est présenté au Tableau 3.38.

Tableau 3.38 Effet du tamisage et de la dilution lors des essais D-TAM*

Paramètres	Unités	Lisier D1			Lisier D2		
		NT	T3	T8	NT	T3	T8
ST	g L^{-1}	7,15±0,17	9,57±0,33	6,71±0,54	11,4±0,44	22,5±1,72	10,7±0,27
	% enl.	*69,5*	*64,9*	*64,6*	*71,0*	*40,6*	*72,5*
MES	g L^{-1}	1,21±0,28	1,02±0,11	1,34±0,18	2,47±0,37	8,62±1,55*	0,90±0,17
	% enl.	*79,8*	*85,3*	*49,7*	*90,8*	*63,1*	*92,1*
pH	-	7,15	7,64	7,47	7,20	7,55	7,19
POR	mV	-371	-381	-386	-340	-377	-349
Siccité (FS)	%	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
N-NTK	mg L^{-1}	567	965	719	1400	1440	554
	% enl.	*66,1*	*4,46*	*61,6*	*- 21,4*	*16,8*	*73,5*
$N\text{-}NH_4$	mg L^{-1}	265±18,2	328±78,3	225±17,7	547±59,5	482±10,6	478±
	% enl.	*60,1*	*54,7*	*52,3*	*- 41,3*	*- 23,6*	*- 21,9*
N-org	mg L^{-1}	302	637	494	853	958	76**
	% enl.	*70,0*	*-123****	*63,2*	*-19,6*	*28,5*	*95,5***
P_{tot}	mg L^{-1}	88,1±3,39	80,2±7,67	72,2±2,92	117±10,3	235±3,54	169±5,02
	% enl.	*56,6*	*77,4*	*61,1*	*62,8*	*53,3*	*58,2*
$P\text{-}PO_4$	mg L^{-1}	10,4±2,52	8,4±1,28	19,1±13,6	31,8±1,20	35,3±0,98	14,0±5,17
	% enl.	*81,3*	*90,4*	*58,5*	*68,9*	*66,4*	*83,4*
P-org	mg L^{-1}	77,7±	71,8±	53,1±	85,2±	200±	155±
	% enl.	*47,5*	*73,0*	*62,1*	*60,0*	*49,7*	*51,7*
$N\text{-}NH_4/P_{tot}$	-	3,01	4,09	3,12	4,68	2,05	2,83

* Essais de flottation d'une durée de 68 h à 22°C avec le polymère Percol 765 (1 g L^{-1}) à 17% v v^{-1}.

** Valeur incohérente

*** Valeur incohérente : l'enlèvement indiqué ici est dû à la concentration en N-org du lisier brut D1-T3, dont la concentration était elle aussi anormale.

L'enlèvement des MES est satisfaisant (toujours < à 3 g L^{-1}). Par contre, le tamisage à 8 mm donne un taux élevé pour le lisier D2-T8 (92,1%), alors qu'il est plutôt faible dans le cas du lisier D1-T8 (49,7%). Cette valeur basse est attribuable à la faible concentration en ST du lisier (D1 brut) dès le départ. Il en est de même pour les lisiers D1-T3 (85,3%) et D2-T3 (63,1%).

L'enlèvement du P_{tot} dans la fraction liquide est satisfaisant pour les six sortes de lisiers (53,2 à 77,4%). Par contre, les rapports $N\text{-}NH_4/P_{tot}$ sont nettement inférieurs à 7 quelque soit le lisier. On note en effet dès le départ que la concentration en P_{tot} des lisiers D2 tamisés est élevée, et que bien que l'enlèvement soit efficace, il n'est pas suffisant. De plus, la teneur en ammonium des lisiers bruts de départ est moins élevée que pour le lisier porcin. Le lisier D2-NT donne le meilleur rapport (4,7).

Les teneurs en phosphates dans la fraction liquide diminuent fortement, les formes dissoutes de P sont donc moins présentes dans la fraction liquide une fois la flottation ou la décantation réalisée. De nouveau, on ne peut seulement émettre les hypothèses que les phosphates en solution se sont liés pour donner du phosphore inorganique particulaire (*Massé et al.*, 2006) ou qu'ils ont été assimilés par la flore microbienne et convertis en phosphore organique (Blais, 2006)

Au final, un lisier non tamisé avec une teneur initiale en ST de 3,5% permet d'obtenir de meilleurs résultats de flottation.

3.4.3 Tests de température (D-TEM)

Suite aux résultats obtenus avec les autres lisiers, il a été convenu de ne pas effectuer ce test. Les essais ont donc toujours été réalisés à température ambiante (20-22°C).

3.4.4 Tests de durée de flottation (D-FLO)

Cet essai a été effectué comme préconisé ci-dessus, c'est-à-dire à l'aide du polymère Percol 765 à 17% v v^{-1} (à 1 g L^{-1}), avec un lisier brut non tamisé dilué à 36,1±4,3 g L^{-1} de ST (environ 1/2), et à température ambiante. Les caractéristiques du lisier de départ sont exposées au Tableau 3.39.

Tableau 3.39 Caractéristiques du lisier brut lors des essais D-FLO

Paramètres	Unités	Lisier D1
ST	g L^{-1}	36,1±4,3
MES	g L^{-1}	4,28±2,42
pH	-	7,19
POR	mV	-257
N-NTK	mg L^{-1}	1680
$N\text{-}NH_4$	mg L^{-1}	731±54
N-org	mg L^{-1}	949
P_{tot}	mg L^{-1}	335±17
$P\text{-}PO_4$	mg L^{-1}	219±6
P-org	mg L^{-1}	116±23
$N\text{-}NH_4/P_{tot}$	-	2,18

De plus, son pH et son POR correspondent bien aux teneurs retrouvées dans le lisier de vache-génisse. Pourtant, contrairement au lisier vache-génisse (B), la flottation n'a commencé qu'après plus de 72 h de test. Dans ces conditions, il est impossible d'envisager l'utilisation de la flottation biologique pour le traitement de ce lisier à grande échelle. Les essais avec ce lisier n'ont donc pas été poursuivis.

3.4.5 Conclusion pour la flottation du lisier de vache laitière-génisse (D)

Bien que la flottation soit possible, que le volume de solides décantés dans le fond du cône soit quasi inexistant pour les essais sélectionnés (Annexe E) avec deux types de polymères (Zetag 7654

et Percol 765), à une concentration de 17% v v^{-1} et que le tamisage ne soit pas nécessaire, le temps de flottation minimal nécessaire reste très élevé et ne permet pas d'envisager une mise à l'échelle du procédé de flottation biologique pour ce lisier de vache-génisse. Comme pour le lisier C provenant de la même exploitation, l'utilisation de litière à base de sciure de bois empêcherait la flottation, comme indiqué par Barrington (1997). La flottation naturelle n'a pas lieu sans ajout de polymère (témoins), et cette décantation n'amène pas de meilleurs résultats que la flottation assistée.

3.5 Lisier de vache-génisse (E)

3.5.1 Tests de polymères (E-POL)

Ce test est présenté en deux parties (tests E-POL-1 et E-POL-2 avec 1 g L^{-1} de polymère). Cependant, seuls les résultats de l'essai ayant le mieux fonctionné seront présentés ici.

Le test E-POL-1 a été réalisé avec les mêmes polymères que pour le lisier de vache-génisse D et le lisier était dilué d'environ 1/4 (concentration du lisier dilué = 22,4±1,0 g L^{-1}). Dans ce cas, comme pour le lisier D, deux polymères (Zetag 7654 et Percol 765) permettaient d'obtenir des flocs. Les flocs obtenus sont très gros (5) dans les deux cas. Il n'est pas nécessaire d'observer la séparation ou l'aspect du surnageant pour la décantation. Le test E-POL-1 seul ne permet donc pas de distinguer les deux polymères.

Comme pour le précédent lisier, il fallait diluer le lisier brut pour le test POL-2 afin d'obtenir une séparation S/L, car la concentration initiale en ST du lisier de vache-génisse (E) était de 80,8±1,6 g L^{-1} (dilution 1/2,5). Les caractéristiques du lisier brut pour le test E-POL-2 sont présentées au Tableau 3.42. Le test E-POL-2 a donc été réalisé avec les polymères Zetag 7654 et Percol 765. Suite à ce test, la séparation S/L n'a pas eu lieu, même après 48 h de contact avec le polymère. Le rapport $V_{S/L}$ (calcul à l'Annexe B) montré au Tableau 3.40 confirme ce constat.

Tableau 3.40 Valeurs des rapports $V_{S/L}$ obtenues lors des essais E-POL-2*

Conc. polymère (% v v^{-1})	Zetag 7654	Percol 765
0	- 0,82**	- 0,82
5	- 1,33	n.d.
10	n.d.	n.d.
13	n.d.	3,91
17	n.d.	4,52
20	2,50	2,81

* Essais de flottation d'une durée de 48 h à 22°C.
** Les rapports $V_{S/L}$ négatifs indiquent une décantation (aucune flottation).

Ces résultats indiquent que la séparation S/L est faible, puisque tous les rapports sont supérieurs à 1. Le volume de solide par rapport au liquide reste trop important. Suite à cet essai et aux précédents essais sur le lisier de vache laitière-génisse, on a arrêté les tests par flottation et examiné un système de conditionnement et de tamisage (essai C/T) du lisier. L'aspect des flocs après un contact de 24 h polymère/lisier a été noté afin de sélectionner le polymère le plus performant ainsi que sa concentration (Tableau 3.41).

Tableau 3.41 Aspect des flocs du lisier lors des essais E-POL-2*

Conc. polymère (% v v^{-1})	Zetag 7654	Percol 765
0	petits flocs	petits flocs
5	petits flocs	petits flocs
10	petits flocs	petits flocs
13	petits flocs	moyens flocs
17	moyens flocs	moyens flocs
20	Gros flocs	gros flocs

* Essais de flottation d'une durée de 48 h à 22°C.

D'après ces résultats, la concentration en polymère choisi a été de 20% v v^{-1}. Par contre, ceux-ci ne permettent pas de sélectionner le polymère à employer. Nous avons donc décidé de prendre le plus utilisé en assainissement et donc le plus connu, soit le polymère cationique fort Zetag 7654 pour la suite des essais. L'essai avec le polymère Zetag 7654 à 20% v v^{-1} a été analysé (Tableau 3.42).

Tableau 3.42 Caractéristiques des fractions finales lors des essais E-POL-2*

Paramètres	Unités	Lisier brut	Essais E-POL-2
ST	g L^{-1}	32,5±1,6	12,9±0,9
	% enl.		*60,4*
MES	g L^{-1}	13,7±4,3	3,55±1,09
	% enl.		*74,2*
pH	-	7,17	7,18
POR	mV	-570	-359
Siccité (FS)	%	-	7,10
N-NTK	mg L^{-1}	1510	868
	% enl.		*42,5*
$N\text{-}NH_4$	mg L^{-1}	769±76	902±121**
	% enl.		*- 17,3*
N-org	mg L^{-1}	741	≈0
	% enl.		-
P_{tot}	mg L^{-1}	288±12	189±9
	% enl.		*34,4*
$P\text{-}PO_4$	mg L^{-1}	72,3±14,1	51,8±21,4
	% enl.		28,4
P-org	mg L^{-1}	216±26	137±31
	% enl.		*36,6*
$N\text{-}NH_4/P_{tot}$	-	2,67	4,77

* Essais de flottation d'une durée de 24 h à 22°C avec le polymère Zetag 7654 (1 g L^{-1}) à 20% v v^{-1}.
** Valeur incohérente : La teneur en $N\text{-}NH_4$ est inférieure à celle du N-NTK.

Ces résultats indiquent un enlèvement élevé des ST et des MES dans la fraction liquide, 60,4% et 74,2%, respectivement. Cependant, le taux de MES restait élevé (3,55±1,09 g L^{-1}), la séparation S/L étant incomplète.

Le rapport $N\text{-}NH_4/P_{tot}$ reste assez bas (4,77), car l'enlèvement du phosphore est faible. Comme le phosphore est principalement sous forme liée aux MES et que leur teneurs sont encore élevées dans la fraction liquide finale (3,55±1,09 g L^{-1}), on peut supposer que cette enlèvement insuffisant est la cause du faible enlèvement des Ptot de la fraction liquide (34,4%). Par contre, le taux de $N\text{-}NH_4$ a augmenté, ce qui pourrait s'expliquer par une transformation en azote ammoniacale de l'N-org (ammonification : Ni, 1999). De plus, la teneur en N-NTK est plus faible que celle de $N\text{-}NH_4$. Les pertes pouvant être importantes lors de la réalisation de l'analyse des N-NTK, on peut sans doute émettre l'hypothèse que l'enlèvement en N-NTK est en réalité surestimé ici.

3.5.2 Tests de conditionnement/tamisage (E-CT)

3.5.2.1 Tests de tamisage du lisier pour différentes teneurs en ST (E-CT-1)

Cet essai a été réalisé avec le polymère Zetag 7654 à une concentration de 20% v v^{-1} (à 1 g L^{-1}).

Cet essai visait à évaluer les types de lisiers à étudier pour les prochains essais de conditionnement/tamisage. Il n'était donc pas nécessaire de faire toutes les analyses pour les lisiers bruts. Les caractéristiques suivantes des lisiers bruts serviront donc à sélectionner les conditions idéales pour la suite des essais : ST, MES et rapport $V_{S/L}$ final.

Aux vues des précédents lisiers, le tamisage initial du lisier brut avant les essais donnait de mauvais résultats de séparation S/L. Il a donc été décidé de tester le tamisage initial (3 et 8 mm) uniquement pour le lisier à environ 40 g L^{-1} (le plus représentatif d'un lisier brut non dilué : E3), afin d'observer la différence avec du lisier non tamisé à la même concentration (Tableau 3.43). Si les résultats sont concluants, l'effet du tamisage initial devra être également évalué pour les autres concentrations (lisiers E1 et E2).

Tableau 3.43 Caractéristiques des lisiers bruts lors des essais E-CT-1

Paramètres	Unités	Lisiers bruts				
		E1-NT	E2-NT	E3-NT	E3-T8	E3-T3
Dilution	-	1/4,5	1/3,5		1/2	
ST	g L^{-1}	18,3±2,8	22,5±0,7	39,2±1,2	38,6±0,5	38,9±0,6
MES	g L^{-1}	8,27±0,89	8,86±2,74	10,3±0,2	11,7±0,7	20,0±5,9

Le contact polymère/lisier a été d'environ 15 h. Suite à cette étape, le lisier a été tamisé à 3 puis 1 mm, pour évaluer l'effet du tamisage des fractions finales. Les résultats obtenus sont présentés aux Tableaux 3.44 et 3.45.

Tableau 3.44 Valeurs des ST, MES et rapports $V_{S/L}$ obtenues lors des essais E-CT-1 pour les fractions finales tamisées à 3 mm*

Paramètres	Unités	E1-NT	E2-NT	E3-NT	E3-T8	E3-T3
		Tamisage final (mm)				
		3	3	3	3	3
ST	g L^{-1}	3,11±0,44	6,68±1,81	13,7±2,1	18,6±1,6	26,6±3,6
	% enl.	*83,0*	*70,0*	*64,1*	*51,7*	*31,7*
MES	g L^{-1}	0,69±0,10	1,59±0,22	4,24±0,39	6,82±3,23	10,7±1,4
	% enl.	*91,7*	*82,1*	*59,7*	*41,6*	*46,3*
Siccité (FS)	%	8,10	9,40	10,4	10,9	6,60
$V_{S/L}$	-	0,008	0,084	0,133	n.d.	0,105

* Essais de conditionnement/tamisage d'une durée de 15 h à 22°C avec le polymère Zetag 7654 (1 g L^{-1}) à 20% v v^{-1}.

Tableau 3.45 Valeurs des ST, MES et $V_{S/L}$ obtenues lors des essais E-CT-1 pour les fractions finales tamisées à 1 mm*

Paramètres	Unités	E1-NT	E2-NT	E3-NT	E3-T8	E3-T3
		Tamisage final (mm)				
		1	1	1	1	1
ST	g L^{-1}	4,94±1,57	7,31±1,47	12,3±1,2	16,6±0,6	24,4±1,7
	% enl.	*73,0*	*67,2*	*67,6*	*57,1*	*37,2*
MES	g L^{-1}	0,67±0,02	1,86±0,55	2,53±0,31	4,12±0,54	8,89±0,73
	% enl.	*91,9*	*79,0*	*75,9*	*64,8*	*55,5*
Siccité (FS)	%	n.d.	8,0	8,8	8,6	9,9
$V_{S/L}$	-	0,005	0,007	0,009	n.d.	0,136

* Essais de conditionnement/tamisage d'une durée de 15 h à 22°C avec le polymère Zetag 7654 (1 g L^{-1}) à 20% v v^{-1}.

Concernant les ST et les MES, l'enlèvement est important, particulièrement pour les lisiers E1 et E2. La concentration finale de MES est inférieure à 3 g L^{-1} quel que soit le tamisage final (1 ou 3 mm) pour les lisiers E1-NT et E2-NT. De plus, pour une concentration en ST sensiblement identique au départ, le lisier qui n'a pas été préalablement tamisé (E3-NT) avant l'ajout du polymère 7654 (à 1 g L^{-1} et à 20% v v^{-1}) a donné de meilleurs résultats par rapport au lisier tamisé (E3-T8 et E3-T3) :

- **Tamisage final de 3 mm** : 64,1% d'enlèvement des ST pour E3-NT contre 51,7 et 31,7% pour E3-T8 et E3-T3 ; 59,7% d'enlèvement des MES pour E3-NT contre 41,6 et 46,3% pour E3-T8 et E3-T3.
- **Tamisage final de 1 mm** : 67,6% d'enlèvement des ST pour E3-NT contre 57,1 et 37,2% pour E3-T8 et E3-T3 ; 75,9% d'enlèvement des MES pour E3-NT contre 64,8 et 55,5% pour E3-T8 et E3-T3.

Ceci permet donc d'éliminer une étape, celle du tamisage initial qui paraît inutile. Un autre constat peut être émis. Le tamisage final à 3 mm paraît suffisant, car celui à 1 mm ne semble pas apporter de modifications notables à l'enlèvement des MES et des ST. Le lisier brut doit donc être dilué à une concentration près de 20 g L^{-1} (lisier E1 et E2) et non tamisé.

La siccité de la FS n'est pas toujours supérieure à 10% comme il était souhaité initialement. Cependant, il est essentiel d'indiquer que le tamisage à 3 mm permettant d'éliminer la majeure partie des matières solides, l'évaluation de ST de la FS pour les fractions de 1 mm a été faite sur un petit échantillon, ce qui est moins fiable.

Les rapports Volume de solide/Volume de liquide ($V_{S/L}$) sont également très faibles après tamisage et décantation (même s'ils augmentent avec la teneur initiale en ST). Là encore, le tamisage préalable entraîne un mélange S/L plus important. Dans le cas du lisier E3-T8, il était impossible de calculer le rapport $V_{S/L}$, car les deux phases étaient mélangées, même après 15 h d'essai.

Les résultats obtenus sont donc plutôt concluants, pour la séparation par décantation après 15 h de contact polymère/lisier.

Puisque le tamisage initial du lisier ne permettait pas une bonne séparation par C/T (E3-T8 et E3-T3), il a été décidé d'analyser les autres paramètres uniquement pour les lisiers non tamisés au départ (E1-NT, E2-NT et E3-NT), ainsi que les fractions finales tamisées correspondantes (Tableaux 3.46, 3,47 et 3.48).

Tableau 3.46 Effet du tamisage et de la dilution lors des essais E-CT-1 avec le lisier brut E1-NT*

Paramètres	Unités	Lisier brut	Essai E-CT-1 (après tamisage final)	
		E1-NT	E1-NT	
		Tamisage final (mm)		
		Aucun	3	1
ST	g L^{-1}	18,3±2,8	3,11±0,44	4,94±1,57
	% enl.		*83,0*	*73,0*
MES	g L^{-1}	8,27±0,89	0,69±0,10	0,67±0,02
	% enl.		*91,7*	*91,9*
Siccité (FS)	%		8,10	n.d.
NTK	mg L^{-1}	807	465	498
	% enl.		*42,4*	*38,3*
$N\text{-}NH_4$	mg L^{-1}	477±201**	408±6	368±73
	% enl.		*14,5*	*22,7*
N-org	mg L^{-1}	330	57	130
	% enl.		*82,7*	*60,6*
P_{tot}	mg L^{-1}	173±6	97,5±2,3	91,8±1,9
	% enl.		*43,6*	*46,9*
$P\text{-}PO_4$	mg L^{-1}	45,1±12,	39,7±5,8	24,4±4,2
	% enl.		*11,9*	*45,8*
P-org	mg L^{-1}	128±19	57,8±8,1	67,4±6,0
	% enl.		*54,8*	*47,3*
$N\text{-}NH_4/P_{tot}$	-	2,76	4,18	4,01

* Essais de condition./tamisage d'une durée de 15 h à 22°C avec le polymère Zetag 7654 (1 g L^{-1}) à 20% v v^{-1}.
** Ecart-type élevé, valeur non significative.

Tableau 3.47 Effet du tamisage et de la dilution lors des essais E-CT-1 avec le lisier brut E2-NT*

Paramètres	Unités	Lisier brut	Essai E-CT-1 (après tamisage final)	
		E2-NT	E2-NT	
			Tamisage final (mm)	
		Aucun	3	1
ST	g L^{-1}	22,5±0,7	6,68±1,81	7,31±1,47
	% enl.		*70,3*	*67,2*
MES	g L^{-1}	8,86±2,74	1,59±0,22	1,86±0,55
	% enl.		*82,1*	*79,0*
Siccité (FS)	%	-	9,4	8,0
NTK	mg L^{-1}	1130	736	676
	% enl.		*34,9*	*40,2*
$N\text{-}NH_4$	mg L^{-1}	542±78	372±10	644±153**
	% enl.		*31,4*	*- 18,8*
N-org	mg L^{-1}	588	364	32
	% enl.		*38,1*	*94,6*
P_{tot}	mg L^{-1}	234±11	160±4	153±1
	% enl.		*31,8*	*34,7*
$P\text{-}PO_4$	mg L^{-1}	123±27	34,5±6,4	26,6±3,4
	% enl.		*72,0*	*78,4*
P-org	mg L^{-1}	111±38	126±10	126±4
	% enl.		*-13,5*	*-13,5*
$N\text{-}NH_4/P_{tot}$	-	2,31	2,33	4,21

* Essais de condition./tamisage d'une durée de 15 h à 22°C avec le polymère Zetag 7654 (1 g L^{-1}) à 20% v v^{-1}.

** Ecart-type élevé, valeur non significative.

Tableau 3.48 Effet du tamisage et de la dilution lors des essais E-CT-1 avec le lisier brut E3-NT*

Paramètres	Unités	Lisiers bruts	Essai E-CT-1 (après tamisage final)	
		E3-NT	E3-NT	
		Tamisage final (mm)		
		Aucun	3	1
ST	g L^{-1}	39,2±1,2	13,7±2,1	12,3±1,2
	% enl.		*64,1*	*67,6*
MES	g L^{-1}	10,3±0,2	4,24±0,39	2,53±0,31
	% enl.		*59,7*	*75,9*
Siccité (FS)	%	-	10,4	8,8
NTK	mg L^{-1}	1660	1070	1040
	% enl.		*35,5*	*37,3*
$N\text{-}NH_4$	mg L^{-1}	1030±66	437±21	870±114**
	% enl.		*57,6*	*15,5*
N-org	mg L^{-1}	630	633	170
	% enl.		*≈0*	*73,0*
P_{tot}	mg L^{-1}	326±34	221±15	224±5
	% enl.		*32,3*	*31,5*
$P\text{-}PO_4$	mg L^{-1}	95,2±38,0	46,4±2,8	50,5±31,6
	% enl.		*51,2*	*46,9*
P-org	mg L^{-1}	231±72	175±18	174±36
	% enl.		*24,2*	*24,7*
$N\text{-}NH_4/P_{tot}$	-	3,16	1,98	3,89

* Essais de condition./tamisage d'une durée de 15 h à 22°C avec le polymère Zetag 7654 (1 g L^{-1}) à 20% v v^{-1}.
** Ecart-type élevé, valeur non significative.

L'enlèvement du P_{tot} de la fraction liquide au cours de ce test est plutôt élevé, particulièrement pour le lisier E1, ce qui est logique puisque les rendements d'enlèvement des ST et des MES étaient excellents pour ce lisier. Par contre, le tamisage à 1 mm ne semble pas nécessaire, puisqu'il n'entraîne pas une meilleure élimination du P_{tot} dans la fraction liquide. De plus, le tamisage à 1 mm diminue le taux de $N\text{-}NH_4$, ce qui n'est pas intéressant, car nous souhaitons conserver le plus possible de $N\text{-}NH_4$ dans la fraction liquide pour un meilleur amendement.

Les rapports $N\text{-}NH_4/P_{tot}$ restent nettement inférieurs à 7. Cependant, pour les lisiers E1 et E2, la concentration initiale en $N\text{-}NH_4$ est très inférieure à la concentration dans du lisier de porc pour une même teneur en ST de départ.

La perte en phosphates est importante, mais loin d'être suffisante pour obtenir un bon rapport $N\text{-}NH_4/P_{tot}$. Étant donné que seul l'enlèvement des MES pour la fraction E3-NT tamisé à 3mm ne permet pas d'atteindre le critère de 3 g L^{-1} de concentration finale (4,24±0,39 g L^{-1}), le phosphore qui reste dans le liquide des autres fractions doit être lié aux colloïdes.

L'azote N-NTK diminue également. Cette baisse est essentiellement attribuable à l'azote lié à la fraction solide, si l'on compare à la teneur en ammonium.

En conclusion, le tamisage initial n'est pas nécessaire et celui à 1 mm à la fin non plus. Le seul tamisage choisi pour le prochain essai est donc celui de 3 mm à la fin du test. Par contre, il vaut mieux diluer le lisier (approximativement à 20 g L^{-1}), même si cela entraîne des coûts supplémentaires.

3.5.2.2 Nouveaux tests de polymères (E-CT-2)

On a dilué le lisier à environ 20,9 g L^{-1} (dilution 1/4) sans faire de tamisage initial pour la suite des tests. Après contact avec le polymère pendant 1 h, le lisier a été tamisé à 3 mm, puis mis à décanter pendant encore 1 h, pour pouvoir évaluer le rapport $V_{S/L}$. Ce test a permis d'évaluer si, pour une concentration de départ de 20,0 g ST L^{-1}, l'ajout de polymère à 20% v v^{-1} n'était pas trop élevé, et si un temps de contact polymère/lisier d'une heure suffisait à la floculation/décantation.

Cet essai a été réalisé avec des concentrations en polymère initiales de 10, 13 et 17 % v v^{-1}. Les résultats obtenus après contact d'une heure, tamisage à 3 mm et décantation d'une heure sont présentés au Tableau 3.49.

Tableau 3.49 Effet de la concentration de polymère lors des essais E-CT-2*

Paramètres	Unités	Lisier brut	Essai E-CT-2		
		NT	Conc. Zetag 7654 (% v v^{-1})		
			10	13	17
			Tamisage final (mm)		
			3	3	3
ST	g L^{-1}	20,9±0,7	11,3±0,5	10,0±0,2	8,71±0,25
	% enl.		*45,6*	*52,1*	*58,3*
MES	g L^{-1}	8,20±1,05	4,28±0,37	2,50±0,25	2,06±0,15
	% enl.		*47,8*	*69,5*	*74,9*
Siccité (FS)	%	-	10,2	6,80	11,0
$V_{S/L}$	-	-	0,149	0,071	0,040
N-NTK	mg L^{-1}	983	n.d.	790	n.d.
	% enl.		*n.d.*	*19,6*	*n.d.*
N-NH_4	mg L^{-1}	716±24	946±40	569±35	503±1
	% enl.		*- 32,1*	*20,5*	*29,8*
N-org	mg L^{-1}	267	n.d.	221	n.d.
	% enl.		*n.d.*	*17,2*	*n.d.*
P_{tot}	mg L^{-1}	221±13	184±2	161±3	149±3
	% enl.		*16,8*	*27,5*	*32,7*
P-PO_4	mg L^{-1}	120±13,1	81,8±6,6	82,1±13,8	69,0±8,7
	% enl.		*31,9*	*31,6*	*42,5*
P-org	mg L^{-1}	101±25,7	102±9	78,9±16,9	80,0±12,0
	% enl.		*≈0*	*21,9*	*20,8*
N-NH_4/P_{tot}	-	3,23	5,13	3,54	3,37

* Essais de conditionnement/tamisage d'une durée de 1 h à 22°C après tamisage à 3 mm.

Tout d'abord, en comparaison au test E-CT-1 à 20% v v^{-1} de polymère, ces résultats indiquent que le temps de contact d'une heure ne paraît pas suffisant pour obtenir des résultats optimaux. Ainsi, pour l'essai E-CT-1 avec le lisier brut à 22,5±0,7 g L^{-1} (E2-NT, tamisage final à 3 mm : Tableau 3.47), l'enlèvement des MES permettait d'obtenir une concentration finale de 1,59±0,22 g L^{-1}, l'enlèvement des St était de 70,3% et celui du P_{tot} de 31,8%. Il serait donc intéressant de tester un temps intermédiaire (entre 1 h et 15 h) de contact polymère/lisier.

L'enlèvement des MES, des ST, du P_{tot} et du P-PO_4 augmentent avec la concentration en polymère. Ainsi, à 17% v v^{-1}, malgré le temps de contact court, on obtient un enlèvement des MES supérieur à 70% (74,9%).

La siccité de la FS est supérieure à 10% pour 17% v v^{-1} de polymère.

Les rapports N-NH_4/P_{tot} restent faibles, et inférieur à 7. Bien que la valeur de N-NTK pour 17% v v^{-1} n'ait pu être obtenue, il ressort des autres résultats que l'enlèvement en azote total est plus faible lorsque le contact lisier/polymère est moins grand, alors que l'enlèvement du P-PO_4 reste élevé. Ceci est intéressant, puisqu'on souhaite conserver l'azote et éliminer le phosphore. Là encore, la teneur en N-NH_4 augmentant, on peut supposer qu'il y a formation d'azote ammoniacal au cours du procédé (Equation 1.4).

Au final, la concentration de 17% v v^{-1} serait suffisante, en augmentant le temps de contact polymère/lisier.

3.5.2.3 Enlèvement des particules fines de la fraction liquide (E-CT-3)

Ces tests ont été réalisés afin de savoir s'il est possible, par tamisage et augmentation de la concentration en polymère, d'enlever un maximum de particules fines afin de diminuer la teneur en P_{tot} du liquide final et d'augmenter le rapport N-NH_4/P_{tot}.

Ces essais ont également été réalisés avec le polymère Zetag 7654, pour des concentrations de 15, 20, 25 et 30% v v^{-1} de polymère à 1 g L^{-1}.

Le lisier initial a été dilué à 23,8±1,7 g L^{-1} (dilution environ 1/4), puis une fraction a été tamisée à 3 mm. Le polymère et le lisier étaient en contact pendant 1 h. Ensuite, le lisier était de nouveau tamisé à 3 mm, puisqu'il semble que ce tamisage final permet d'éliminer des MES de la fraction liquide. Les résultats obtenus sont présentés aux Tableaux 3.50 et 3.51.

Tableau 3.50 Effet de la concentration de polymère et du tamisage lors des essais E-CT-3 sans tamisage initial*

Paramètres	Unités	Lisier brut	essais E-CT-3			
		NT	Conc. Zetag 7654 (% v v^{-1})			
			15	20	25	30
			Tamisage final (mm)			
			3	3	3	3
ST	g L^{-1}	23,8±1,7	9,26±0,05	7,19±0,30	5,94±0,22	5,69±0,07
	% enl.		*61,1*	*69,8*	*75,0*	*76,1*
MES	g L^{-1}	8,20±0,27	3,04±0,37	1,38±0,20	1,19±0,21	0,90±0,16
	% enl.		*62,9*	*83,2*	*85,5*	*89,0*
Siccité (FS)	%	-	6,90	8,50	9,40	6,70
$V_{S/L}$	-	-	0,092	0,050	0,036	0,033
N-NTK	mg L^{-1}	428	326	374	351	398
	% enl.		*23,8*	*12,6*	*18,0*	*7,0*
$N\text{-}NH_4$	mg L^{-1}	537±24**	501±28**	440±11**	394±6**	419±36**
	% enl.		*6,7*	*18,2*	*26,6*	*22,0*
N-org	mg L^{-1}	≈0	≈0	≈0	≈0	≈0
	% enl.		≈0	≈0	≈0	≈0
P_{tot}	mg L^{-1}	238±13	145±15	125±2	109±2	106±6
	% enl.		*38,8*	*47,3*	*54,2*	*55,4*
$P\text{-}PO_4$	mg L^{-1}	150±14	116±12	93,9±7,3	88,7±4,2	82,6±4,4
	% enl.		*22,9*	*37,4*	*40,9*	*44,9*
P-org	mg L^{-1}	88,0±27,2	29,0±27,2	31,1±8,8	20,3±6,5	23,4±10,3
	% enl.		*67,0*	*64,7*	*76,9*	*73,4*
$N\text{-}NH_4/P_{tot}$	-	2,26	3,45	3,51	3,62	3,95

* Essais de conditionnement/tamisage d'une durée de 1 h à 22°C.

** Valeurs incohérentes : $N\text{-}NH_4$ > N-NTK : Ces incohérences ne peuvent être expliquées. Cependant, en tenant compte des erreurs (écart-type), nous supposons que l'azote est principalement sous forme ammoniacale.

Tableau 3.51 Effet de la concentration de polymère et du tamisage lors des essais E-CT-3 avec lisier brut tamisé à 3 mm*

Paramètres	Unités	Lisier brut	essais E-CT-3			
		T3	Conc. Zetag 7654 (% v v^{-1})			
			15	20	25	30
			Tamisage final (mm)			
			3	3	3	3
ST	g L^{-1}	15,9±0,8	8,49±0,36	6,90±0,13	5,49±0,24	4,26±0,02
	% enl.		*46,5*	*56,5*	*65,4*	*73,1*
MES	g L^{-1}	6,32±0,56	2,22±0,09	1,50±0,03	0,70±0,05	0,50±0,02
	% enl.		*64,9*	*76,3*	*88,9*	*92,1*
Siccité (FS)	%	-	7,7	6,8	7,5	6,8
$V_{S/L}$	-	-	0,048	0,034	0,013	0,010
N-NTK	mg L^{-1}	438	216**	390	414	352
	% enl.		*50,7*	*11,0*	*5,5*	*19,6*
$N\text{-}NH_4$	mg L^{-1}	508±4***	419±20***	456±26***	386±9***	377±20***
	% enl.		*17,4*	*10,1*	*24,0*	*25,7*
N-org	mg L^{-1}	≈0	≈0	≈0	≈0	≈0
	% enl.		*≈0*	*≈0*	*≈0*	*≈0*
P_{tot}	mg L^{-1}	194±6	155±6	125±2	105±8	89,6±3,6
	% enl.		*19,9*	*35,5*	*45,6*	*53,8*
$P\text{-}PO_4$	mg L^{-1}	135±6,24	111±9,54	96,7±8,28	83,5±2,98	74,9±1,97
	% enl.		*17,8*	*28,4*	*38,1*	*44,5*
P-org	mg L^{-1}	59,0±12,5	44,0±15,3	28,3±10,3	21,5±10,5	14,7±5,5
	% enl.		*25,4*	*52,0*	*63,6*	*75,1*
$N\text{-}NH_4/P_{tot}$	-	2,62	2,70	3,65	3,66	4,21

* Essais de conditionnement/tamisage d'une durée de 1 h à 22°C.

** Valeur incohérente : enlèvement trop important. Cette incohérence ne peut être expliquée.

*** Valeurs incohérentes : $N\text{-}NH_4$ > N-NTK : Ces incohérences ne peuvent être expliquées. Cependant, en tenant compte des erreurs (écart-type), nous supposons que l'azote est principalement sous forme ammoniacale.

De façon générale, qu'il y ait tamisage ou non au départ, l'augmentation de la concentration en polymère permet d'améliorer l'enlèvement des MES, des ST, ainsi que du phosphore, et de diminuer le rapport $V_{S/L}$.

Les résultats obtenus pour l'essai E-CT-3 indiquent que malgré l'enlèvement du P_{tot}, les rapports N-NH_4/P_{tot} sont toujours faibles (2,70 à 4,21). Cependant, comme la teneur en N-NH_4 du lisier brut est faible, il ne sera sans doute jamais possible d'atteindre un rapport supérieur à 7, comme pour le lisier de porc.

Sans tamisage initial, l'enlèvement des MES ne dépasse pas 89% au maximum pour une concentration en polymère de 30% v v^{-1}, mais permet d'obtenir une concentration finale correspondant aux exigences de la décantation (0,90 g L^{-1}). Il s'agit toutefois d'une concentration en polymère importante, engendrant des coûts supplémentaires.

Par contre, lorsque le lisier est tamisé à 3 mm au départ, la diminution de la teneur en ST et MES du lisier brut entraîne directement un enlèvement important de MES. Ainsi, à 30% de polymère v v^{-1}, le taux de MES dans la fraction liquide finale n'est plus que de 0,50 g L^{-1}.

De plus, le rapport $V_{S/L}$ indique qu'il ne reste que très peu de particules solides décantées au final.

3.5.3 Conclusion pour le conditionnement/tamisage du lisier de vache-génisse E

Il semble qu'il soit possible d'employer une autre méthode que la flottation biologique pour traiter le lisier de vache-génisse mélangé ; en effet, il ressort de ces essais de conditionnement/tamisage que le lisier décante facilement, et qu'une simple dilution et un tamisage initial et final permettrait de satisfaire aux exigences d'enlèvement des MES. De plus, même si le rapport N-NH_4/P_{tot} reste faible, ceci est principalement dû aux caractéristiques initiales du lisier de vache, pour lequel la quantité globale d'azote non oxydé (N-NTK) est plus basse que chez le lisier de porc, et l'azote se présente plutôt sous forme organique fixée.

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

La présente étude a démontré que la technologie LISOX n'est pas applicable à tous les types de lisiers de bovins. Les polymères cationiques semblent les plus appropriés, bien qu'un polymère neutre ait donné des résultats de floculation satisfaisant pour un lisier de vache-génisse mélangé. La sélection du type de polymère pour chaque type de lisier est la suivante : le Zetag 7557 pour le lisier de veau, le Zetag 7654 pour les lisiers de litière de paille et le Percol 765 pour les lisiers de litière de sciure de bois. Les concentrations de polymère à ajouter varient fortement d'un lisier à l'autre, et il en va de même pour le temps de flottation. Le tamisage n'est pas recommandé pour la flottation, car il empêche la formation de flocs. La température du lisier soumis à la flottation doit être maintenue au-dessus de 20°C.

Les indices ICMF et ICQF permettent uniquement de donner un aperçu de la réussite de la séparation solide/liquide, mais leur calcul a donné dès le début des informations importantes sur le comportement de chaque lisier. En effet, seul le lisier de veau a permis d'obtenir des indices ICMF/ICQF de cote B, et c'est le seul présentant un potentiel pour la flottation.

De même, le lisier de veau se rapproche de la valeur cible de 7 pour le rapport $N\text{-}NH_4/P_{tot}$, tandis que les autres lisiers en sont loin. Bien que l'enlèvement du phosphore dans la fraction liquide soit assez efficace pour tous les lisiers flottés (27,8 à 81,0%), l'enlèvement de l'azote varie beaucoup plus (0 à 60,1%). Les lisiers de vache-génisse présentent une teneur en azote organique plus élevée que le lisier de veau ($N\text{-}NTK\text{-}N\text{-}NH_4$). L'enlèvement de l'azote ammoniacal le plus élevé a été obtenu pour les lisiers de vache-génisse. Pour cette raison, les valeurs des rapports $N\text{-}NH_4/P_{tot}$ étaient plus faibles pour ces lisiers. Ainsi, les concentrations en N-NTK diminuaient fortement pour les lisiers de vache-génisse (0 à 74,0%).

Eu égard à l'ensemble des résultats, on peut constater que des taux d'enlèvement des MES variant entre 82 et 98% ont été mesurés lors de la flottation biologique assistée (ajout de polymère), comparativement aux pourcentages d'enlèvement se situant entre 75 et 82% enregistrés lors de la flottation biologique naturelle (sans ajout de polymère). En fait, la floculation préalable du lisier contribuait de 0 à 23% à augmenter l'efficacité de la flottation biologique.

La siccité de la fraction solide finale est, pour la plupart des tests, nettement en dessous de 10%. Cependant, les essais en laboratoire ne sont pas totalement représentatifs d'un système à l'échelle de la ferme, par exemple, et l'étape de séparation solide/liquide moins aisée (nous ne disposons pas du même matériel, comme la vis sans fin permettant de mieux séparer liquide et solide en fin de traitement).

Les caractéristiques initiales du lisier influencent la réussite d'une séparation par flottation biologique. Le lisier de veau est plus liquide et plus proche d'un lisier de porc que les lisiers de vache-génisse.

Il apparait donc que la flottation biologique selon la technologie LISOX ne peut être employée pour du lisier de vache-génisse, mais uniquement pour du lisier de veau. Or, ce marché ne constitue pas le secteur principal de l'élevage. Ce lisier ne présente pas, pour l'instant, un potentiel suffisant avec le procédé LISOX pour permettre des essais à plus grande échelle.

Par contre, il est possible de mettre au point un autre système de séparation de phase solide/liquide pour le lisier de vache-génisse. En effet, ce dernier montre un potentiel de séparation de phase par conditionnement-tamisage. Dans ce cas, les résultats d'enlèvement des solides totaux et du phosphore total, ainsi que la concentration finale des MES pour un lisier brut à environ 20 g L^{-1} de ST sont plutôt satisfaisants :

- Concentration finale en MES : 0,50±0,02 à 4,28±0,37 g L^{-1}
- Enlèvement des solides totaux : 46,5 à 76,1%
- Enlèvement du P_{tot} : 16,8 à 94,6%

Par contre, il n'est toujours pas possible d'atteindre la valeur cible du lisier de porc pour le rapport $N\text{-}NH_4/P_{tot}$. Comme il y a des différences importantes de concentrations initiales en azote des deux types de lisiers, cette valeur devra être revue à la baisse.

En somme, un système de traitement du lisier par conditionnement (dilution et ajout d'un polymère) et tamisage (de la fraction initiale et/ou finale) permettrait d'obtenir une fraction liquide fortement allégée en phosphore et une fraction solide qui, bien que nécessitant un égouttage ou un séchage pour en diminuer la teneur en eau, concentrerait le phosphore.

Dans un second temps, il est possible d'évaluer quelques critères permettant de situer le potentiel et les capacités de cette méthode, par rapport aux technologies concurrentes, bien qu'elle ne soit qu'au stade expérimental. Ainsi, la nature principale du procédé est physico-chimique, puisqu'on réalise une séparation de phase, avec ajout de floculants. Contrairement à la flottation, ce conditionnement/tamisage ne fait pas appel aux microorganismes, et donc évite les contraintes de température minimale du milieu pour le fonctionnement du système. Le type de traitement serait partiel, mais sans doute suffisant pour la disposition des sous-produits. Enfin, au niveau des coûts, ce type de procédé nécessiterait principalement des tamis et un système de recirculation pour la dilution du lisier. Ce type d'installation étant déjà bien connu et implanté dans de nombreux systèmes de traitement des eaux usées, son coût serait minime par rapport aux traitements physico-chimiques existants.

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 un potentiel au procédé. D'éventuels bénéfices liés aux coûts d'investissement et d'opération et aux volumes à gérer seraient envisageables au niveau économique.

La technologie en développement présente, à ce stade-ci, les avantages et les inconvénients cités au Tableau 3.52.

Tableau 3.52 Avantages et inconvénients escomptés de la nouvelle technologie

Séparation physico-chimique par conditionnement/tamisage
Avantages :
• Efficacité pour des effluents chargés ;
• Diminution du phosphore et de l'azote ;
• Concentration des ST et MES ;
• Faibles coûts d'opération (sans apport d'oxygène) ;
• Pas de contraintes de chauffage (pas d'activité bactérienne).
Inconvénients :
• Incertitude sur la production de gaz à effets de serre à évaluer ;
• Effets inconnus des coagulants/floculants sur l'environnement et le rendement des cultures ;
• Siccité limitée de la fraction solide.

Finalement, les recommandations suivantes peuvent être émises quant au développement du procédé de séparation physico-chimique du lisier par conditionnement tamisage :

- Trouver un système permettant d'accroître la siccité de la fraction solide (par égouttage comme dans la configuration LISOX actuelle, par exemple) ;
- Approfondir les connaissances relatives à l'effet du type de litière sur les processus en cours ;
- Poursuivre l'étude du potentiel de cette méthode de traitement avec différents lisiers, pour confirmer son aptitude au traitement du lisier bovin ;
- Tester cette méthode à l'échelle pilote.

BIBLIOGRAPHIE

Abdelmagid H.M. et M.A. Tabatabai (1982) Decomposition of acrylamide in soils. *J. Environ. Qual.*, 11 : 701-704.

Abu-Orf M.M. et S.K. Dentel (1997) Effect of mixing on the rheological characteristics of conditioned sludge : full-scale studies. *Water Sci. Technol.*, 36(11) : 51-60.

Acton D.F. et L.J. Gregorich (1995) *La santé de nos sols : Vers une agriculture durable au Canada.* Publication No. 1906/F, Agriculture et Agroalimentaire Canada, Ottawa, ON, Canada.

Ahring B.K., A. Ibrahim et Z. Mladenovska (2001) Effect of temperature increase from 55 to 65°C on performance and microbial population dynamics of an anaerobic reactor treating cattle manure. *Water Res.*, 35(10) : 2446–2452.

APHA (1999) *Standard methods for examination of water and wastewaters.* 19e Édition, American Public Health Association, Washington, DC, États-Unis.

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 (Éditeurs), Elsevier Applied Science Publisher, Silsoe, Angleterre.

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.* Ministère de l'Environnement et de la Faune, Québec, QC, Canada, 75 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.* Rapport de recherche No. 374, INRS-Eau, Université du Québec, Sainte-Foy, QC, Canada, 71 p.

Barrington S. (1997) *Les fumiers de bovins laitiers : une ressource qui se gère.* Symposium sur les bovins laitiers, CPAQ, Québec, QC, Canada, 1997, 36 p.

Barvenik F.W. (1994) Polyacrylamide characteristics related to soil applications. *Soil Sci.,* 158 : 235-243.

Bélanger G. (2002) *Développement d'une technologie de traitement du lisier porcin par flottation biologique.* Mémoire de maîtrise, INRS-Eau, Université du Québec, Sainte-Foy, QC, Canada, 187 p.

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. *Sci. Tech. Eau*, 17(4).

Blais J.F. (2006) *Assainissement des eaux usées.* Cours Eau-454, INRS-ETE, Université du Québec, Québec, QC, Canada, 506 p.

Blais J.F., G. Mercier, G. Bélanger, M. Chartier et D. Leblanc. (2007) *Methods and apparatus for treating animal manure*. United States Patent. No. 7,156,999 B2.

Bolto B. et J. Gregory. (2007) Organic polyelectrolytes in water treatment. *Water Res.*, 41 : 2301–2324.

Bonn F. (2003) *Écologie physique des bassins versants, Chapitre 8 : Érosion et pollution diffuse.* Cours GEO 400, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, QC, Canada.

Bouwman A.F. et D.P. Van Vuuren. (1999) *Global assessment of acidification and eutrophication of natural ecosystems*. Rapport No. 402001012, The Netherlands national institute of public health and the environment (RIVM), Bilthoven, Pays-Bas, 51 p.

Brown L., M.M. Rhead, K.C.C. Bancroft et N. Allen (1980) Model studies of the degradation of acrylamide monomer. *Water Res.*, 14 : 775-778.

Caulfield M.J., G.G. Qiao et D.H. Solomon (2002) Some aspects of the properties and degradation of polyacrylamides. *Chem. Rev.*, 102 : 3067-3083.

Chachkhiani M., P. Dabert, T. Abzianidze, G. Partskhaladze, L. Tsiklauri, T. Dudauri et J.J. Godon (2004) 16S rDNA characterisation of bacterial and archaeal communities during start-up of anaerobic thermophilic digestion of cattle manure. *Bioresource Technol.,* 93 : 227–232.

Chynoweth D.P, A.C. Wilkie et J.M. Owens (1999) Anaerobic Treatment of Piggery Slurry. *Asian-Aus. J. Anim. Sci.*, 12(4) : 607-628.

Comeau Y. (1990) La déphosphatation biologique métabolisme microbien. *Sci. Tech. Eau,* 23(1) : 47-60.

Copeland C. et J. Zinn (1998) *Animal waste management and the environment: Background for current issues*. CRS report No. 98-451, National Council for science and the environment, Washington, DC, États-Unis.

Couture J.N. et L. Robert (2003) *La gestion des fumiers : solide ou liquide*. Direction régionale de la Chaudière-Appalaches, MAPAQ, [en ligne]. http://www.centre-du-quebec.upa.qc.ca/engrais.asp?id_section=89 (Page consultée le 19 mars 2007).

CPVQ (1996) *Grilles de référence en fertilisation.* Québec, Conseil des productions végétales du Québec, 128 p.

CRAAQ (2003) *Charges fertilisantes des effluents d'élevage*, [en ligne]. http://pub.craaq.qc.ca/Transit/2-Protocoles_Echantillonnage.pdf (Page consultée le 19 mars 2007).

Croll B.T., B.M. Arkell et R.P.J. Hodge (1974) Residues of acrylamide in water. *Water Res.*, 8 : 989-993.

Day D.L. et T.L. Funk (1998) *Processing manure : physical, chemical and biological treatment*. In Animal waste utilization : effective use of manure as a soil resource. Hatfield J.L. et B.A. Stewart (Éditeurs), Ann Arbor Press, Chelsea, Michigan, États-Unis, pp. 243-282.

Degrémont (1989) *Mémento technique de l'eau : Tome 1.* Degrémont, Rueil-Malmaison, France, 592 p.

De Rosemond S.J.C. et K. Liber (2004) Wastewater treatment polymers identified as the toxic component of a diamond mine effluent. *Environ. Toxicol. Chem.*, 23(9) : 2234–2242.

Don G.L. et W.F. Donovan (2002) *Environment bay of plenty : First order estimation of the nutrient and bacterial input from aquatic birds to twelve Rotorua lakes*. Bioreasearches, New Zealand, 61 p.

FAO (1999) *Livestock and environment toolbox, Livestock environment and development (LEAD) initiative*, Rome, [en ligne]. http://www.virtualcentre.org/en/dec/toolbox/homepage.htm (Page consultée le 15 avril 2007).

FAO (2003) *World agriculture : Towards 2015/30, An FAO perspective*, FAO, Rome, Italie.

Fédération des producteurs de bovins du Québec (FPBQ) (2003) *La réduction des odeurs, une question d'environnement*, 29 p., [en ligne]. http://www.agrireseau.qc.ca/bovinsboucherie/documents/ReductionDesOdeurs.pdf (Page consultée le 13 mars 2007).

Fédération des producteurs de bovins du Québec (FPBQ) (2006) *Réduire les émissions de GES par la gestion des prairies et pâturages,* 2 p., [en ligne]. http://www.agrireseau.qc.ca/bovinsboucherie/documents/GestionDesPrairiesEtPaturages.pdf (Page consultée le 13 mars 2007).

FPPQ (2003) *Fédération des producteurs de porcs du Québec*, [en ligne]. http://www Leporcduquebec.qc.ca/fppq/prod-4.html (Page consultée le 13 mars 2007).

FPPQ (2005) *Rapport d'évaluation des technologies de gestion et de traitement du lisier de porc*, [en ligne]. http://www Leporcduquebec.qc.ca/fppq/pdf/2005-03-21_traitement_de_lisier.pdf (Page consultée le 01 mai 2007).

Gangbazo G., D. Cluis et C. Bernard (1999) Connaissances acquises en pollution diffuse agricole au Québec 1993-1998 : Analyse et perspectives. *Vecteur environnement,* 32(4) : 36-45.

García-Ochoa F., V.E. Santos, L. Naval, E. Guardiola et B. López (1999) Kinetic model for anaerobic digestion of livestock manure. *Enzyme Microb. Technol.,* 25(1-2) : 55-60.

Garg P., A. Gupta et S. Satya (2006) Vermicomposting of different types of waste using *Eisenia foetida*: A comparative study. *Bioresource Technol.,* 97(3) : 391–395.

Gingras G., D. Bernier, J.G. Bisaillon, 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.* Fédération des producteurs de porcs du Québec, Longueuil, QC, Canada, 61 p.

Giroux M. et R. Grégoire (2000) *Études de différents facteurs affectant la composition des fumiers de bovins de boucherie entreposés en andains au champ, rapport final.* Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA), Sainte-Foy, QC, Canada, 56 p.

Goodrich M.S., L.H. Dulak, M.A. Freidman, et J.J. Lech (1991) Acute and long term toxicity of water-soluble cationic polymers to rainbow trout (*Oncorhynchus mykus*) and the modification of toxicity by humic acid. *Environ. Toxicol. Chem.* 10 : 509-551.

Government of Alberta (1997) *A guide to swine manure management methods.* Research Update No. 730.

Grant R. F., M. Amrani, D. J. Heaney, R. Wright, et M. Zhang (2004) Mathematical Modeling of Phosphorus Losses from Land Application of Hog and Cattle Manure. *J. Environ. Qual.* 33 : 210–231.

Haase T., C. Schüler et J. Heß (2007) The effect of different N and K sources on tuber nutrient uptake, total and graded yield of potatoes (*Solanum tuberosum* L.) for processing. *Eur. J. Agronom.,* 26 : 187–197.

Hojjati S. et F. Nourbakhsh (2007) Effects of cow manure and sewage sludge on the activity and kinetics of L-glutaminase in soil. *Biol Fertil Soils*, 43 : 491–494.

Hooda P.S., A.C. Edwards, H.A. Anderson et A. Miller (2000) A review of water quality concerns in livestock farming areas. *Sci. Total Environ.*, 250(1-3) : 143-167.

Kelleher B.P., J.J. Leahy, A.M. Henihan, T.F. O'Dwyer, D. Sutton et M.J. Leahy (2000) Advances in poultry litter disposal technology – a review. *Bioresource Technol,.* 83 : 27–36.

Lackley R. (2004) *Variabilité la composition des ingrédients des moulées - conséquences sur les rejets d'éléments nutritifs*. Fiche technique du Ministère de l'agriculture, de l'alimentation et des affaires rurales de l'Ontario (MAAARO), Ottawa, ON, Canada.

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*. Rapport de recherche No. 374, INRS-Eau, Université du Québec, Sainte-Foy, QC, Canada, 124 p.

Léonard E. (2001) *Projet bœuf qualité plus*. (Communication personnelle : rapport fourni par l'Union des Producteurs Agricoles, le 02 mai 2007).

Liber K., L. Weber et C. Lévesque (2005) Sublethal toxicity of two wastewater treatment polymers to lake trout fry (*Salvelinus namaycush*). *Chemosphere*, 61 : 1123–1133.

Livestock and poultry environmental stewardship (LPES) (2005) *Livestock and poultry environmental stewardship curriculum : A national educational program*, [en ligne] http://www Lpes.org/Lessons/Lesson01/1_Environmental_Stewradship.html (Page consultée le 17 mars 2007).

Lynch D.P. et J.T. Novak (1991) Mixing intensity and polymer dosing in filter press dewatering. *J. Water Pollut. Control Fed.*, 63(2) : 160-165.

Massé, D.I., F. Croteau et L. Masse (2007) The fate of crop nutrients during digestion of swine manure in psychrophilic anaerobic sequencing batch reactors. *Bioresource Technol.*, 98(15) : 2819-2823.

McDowell R. et A. Sharpley (2002) Phosphorus transport in overflow in response to position of manure application. *J. Environ. Qual.*, 31 ; 217-227.

Mercier, G., J.F. Blais et M. Chartier. (2005) *Innocuité environnementale des coproduits solides et liquides issus du traitement LISOX*. Rapport de recherche confidentiel No. R-801, INRS-ETE, Université du Québec, Québec, Canada, 16 p.

Ministère de l'agriculture de l'alimentation et des affaires rurales de l'Ontario (MAAARO) (2005) *Service de plans du Canada, gaz de fumier* (plan No 10710). [En ligne]. http://www.cps.gov.on.ca/french/ev10000/ev10710.htm. (Page consultée le 13 mars 2007).

Ministère de l'Environnement (2002) *Règlement sur les exploitations agricoles*. Québec, Canada.

Ministère de l'Environnement (2003) *Synthèse des informations environnementales disponibles en matière agricole au Québec.* Direction des politiques du secteur agricole, Québec, Canada, Envirodoq ENV/2003/0025, 143 p.

Ministère de l'Environnement et de la Faune (MEF) (1998) *Orientations et principes pour la détermination des critères relatifs à la valorisation des matières résiduelles fertilisantes.* Service de l'assainissement agricole et des activités de compostage, Québec, Canada, 8 p.

Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP) (2004) *Guide sur la valorisation des matières résiduelles fertilisantes -Critères de référence et normes réglementaires*. Troisième édition, Québec, Canada, 127 p.

Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP) (2007) *Addenda N°2 du guide sur la valorisation des matières résiduelles fertilisantes -Critères de référence et normes réglementaires*. Québec, Canada, 16 p.

Mladenovska, Z. et B.K. Ahring. (2000) Growth kinetics of thermophilic *Methanosarcina* spp. isolated from full-scale biogas plants treating animal manure. *FEMS Microbiol. Ecol.*, 31 : 225–229.

Muirhead R.W., R.J. Davies-Colley, A.M. Donnison et J.W. Nagels (2004) Faecal bacteria yields in artificial flood events : quantifying in-stream stores. *Water Res.*, 38(5) : 1215-1224.

Ni J. (1999) Mechanistic models of ammonia release from liquid manure : a review. *J. Agric. Eng. Res.*, 72 : 1-17.

Nicholson F.A., B.J. Chambers, J.R. Williams et R.J. Unwin (1999) Heavy metal contents of livestock feeds and animal manures in England and Wales. *Bioresource Technol.*, 70 : 23-31.

NRCan (2004) *Market potential of power production from anaerobic digestion of animal manure in Canada.* Fichier No. 2334B04MDC9001, Ressources Naturelles Canada, Ottawa, ON, Canada, 103 p.

Robert L. et J.N. Couture (2000) *Vers une utilisation rationnelle des fumiers et des lisiers.* Conférence prononcée au Colloque régional en gestion agroenvironnementale, Rivière-du-Loup, QC, Canada, 6 p.

Rothwell E. (1974) Manufacture and quality control of synthetic floculents. *Water Treat. Exam.*, 23 : 372-376.

Rowland C.D., G. Allen Burton Jr. et S. M. Morrison (2000) Implication of polymer toxicity in a municipal wastewater effluent. *Environ. Toxicol. Chem.*, 19(8) : 2136–2139.

Sager M. (2007) Trace and nutrient elements in manure, dung and compost samples in Austria. *Soil Biol. Biochem.*, 39 : 1383-1390.

Seybold C.A. (1994) Polyacrylamide review : soil conditioning and environmental fate. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 25(11/12) : 2171-2185.

Shaffer K.A. et B. Cleveland (2007) *Livestock manure production rates and nutrient content.* North Carolina Agricultural Chemicals Manual, College of Agriculture and Life Sciences, North Carolina State University, Caroline du Nord, États-Unis, 4 p.

Sheldon S., S. Lande, S.J. Bosch et P.H. Howard (1979) Degradation and leaching of acrylamide in soil. *J. Environ. Qual.*, 8(1) : 133-137.

Singh N. (2005) Factors affecting triadimefon degradation in soils. *J. Agric. Food Chem.*, 70(53) : 70-75.

Smith E.A., S.L. Prues et F.W. Oehme (1996) Environmental degradation of polyacrylamides II. Effects of environmental (outdoor) exposure. *Ecotox. Environ. Safety*, 37 : 76-91.

SNF (2004) *Profil environnemental des polyacrylamides cationiques (types polyester).* Fiche technique de la compagnie SNF S.A. 41 rue Jean Huss, 42028, Saint-Étienne, Cedex 1, France.

Sobel A.T., D.C. Ludington et K.V. Yow (1988) Altering dairy manure characteristics for solid handling by the addition of bedding. *International Agrophysics*, 4 : 31-48.

Sojka R.E., R.D. Lentz, D.L. Bjorneberg et J.K. Aase (1998) *The PAMphlet : A concise guide for safe and practical use of polyacrylamide (PAM) for irrigation-induced erosion control and infiltration enhancement.* USDA-ARS Northwest Irrigation & Soils Research Lab., Station Note #02-98.

Soto A., J.M. Calabro, N.V. Prechtl, A.Y. Yau, E.F., Orlando, A. Daxenberger, A.S. Kolok, L.J. Guillette Jr., B. Le Bizec, I.G Lange et C. Sonnenschein (2004) Androgenic and estrogenic activity in water bodies receiving cattle feedlot effluent in eastern Nebraska, USA. *Environ. Health Persp.*, 112(3) : 346-352.

Statistiques Canada (2006) No. 21-603 UPF au catalogue. (Communication personnelle).

Statistiques Canada (2007a) *Statistiques de porc.* No. 23-010 XIF au catalogue, 6(1), 43 p.

Statistiques Canada (2007b). *Statistiques de bovins.* No. 23-012 XIF au catalogue, 6(1), 86 p.

Steinfeld H., P. Gerber, T. Wassenaar, V. Castel, M. Rosales et C. de Haan (2006) *Livestock's long shadow, environmental issues and options.* Food and agriculture organization of the United Nations (FAO), Rome, Italie, 408 p.

Theobald O. (1992) *Les traitements du lisier de porc à la ferme : Tome I : Synthèse bibliographique.* Institut Technique du Porc, Paris, France, 50 p.

Thomas W.M. (1964) Acrylamide polymers. *Encycl. Polymer Sci. Technol.*, 1 : 177-197.

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 : *14ième Congrès régional de l'Est du Canada*

de l'Association canadienne sur la qualité de l'eau (ACQE). Association Québécoise des Techniques de l'Eau, 5 novembre, Sherbrooke, QC, Canada.

USDA (2004) US agriculture and forestry greenhouse gas inventory : 1990-2001. U.S. Department of agriculture, Global climate change program. [en ligne] http://www.usda.gov/oce/global_change/gg_inventory.htm (Page consultée le 20 avril 2007).

Vesilind P. A., Capillary suction time as a fundamental measure of sludge dewaterability (1988) *J. Water Pollut. Control Fed.*, 60(2) : 215-220.

Weil C. et W. Kollaard (1995) *So, you want to build an artifical wetland.* Agri-Food Research in Ontario, pp. 7-10.

Wright T. et T. Mutsvangwa (2003) *L'alimentation des bovins laitiers en vue de réduire l'excrétion azotée*. Fiche technique, Ministère de l'agriculture, de l'alimentation et des affaires rurales de l'Ontario (MAAARO), Ottawa, ON, Canada.

Yokoyama H., M. Waki, N. Moriya, T. Yasuda, Y. Tanaka et K. Haga (2007) Effect of fermentation temperature on hydrogen production from cow waste slurry by using anaerobic microflora within the slurry. *Appl. Microbiol. Biotechnol.,* 74 : 474–483.

Zhu J., P.M. Ndegwa et A. Luo (2000) Changes in swine manure solids during storage may affect separation efficiency. *Appl. Eng. Agric.*, 16(5) : 571-575.

ANNEXE A

Démonstration de l'équation de stokes

Les informations sur la démonstration de l'équation de Stokes présentée à cette annexe proviennent de Bélanger (2002).

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,

$$F_G - F_A - F_T = m_p \frac{d\upsilon_s}{dt} \qquad \text{(Équation A1)}$$

où m_p = masse de la particule, kg
υ_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,

$$F_G - F_A - F_T = 0 \qquad \text{(Équation A2)}$$

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

$$F_G - F_A = (\rho_p - \rho_l) g V_p \qquad \text{(Équation A3)}$$

où ρ_p = densité de la particule, $kg \cdot m^{-3}$
ρ_l = densité du liquide, $kg \cdot m^{-3}$
g = accélération gravitationnelle, $m \cdot s^{-2}$
V_p = volume de la particule, m^3

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

$$F_T = C_T A_p \rho_l \frac{\upsilon_s^2}{2} \qquad \text{(Équation A4)}$$

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

En substituant les équations A3 et A4 dans l'équation A2, il est possible de déduire une expression mathématique de la vitesse de sédimentation d'une particule sphérique.

$$\upsilon_s = \sqrt{\frac{4}{3} \frac{g(\rho_p - \rho_l) d_p}{C_T \rho_l}} \qquad \text{(Équation A5)}$$

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 A5, 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. Le nombre de Reynolds se définie comme suit,

$$N_R = \frac{\rho_l v_s d_p}{\eta} \qquad \text{(Équation A6)}$$

où N_R= nombre de Reynolds, sans dimension
η= 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 A.1 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,

$$C_T' = \psi C_T \qquad \text{(Équation A7)}$$

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

Tableau A.2 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 A6 prend la forme suivante pour un régime laminaire,

$$v_s = \frac{g(\rho_p - \rho_w)d_p^2}{18\eta} \qquad \text{(Équation A8)}$$

L'équation A8 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

Méthodes de calcul des propriétés

Tableau B.1 Valeurs du coefficient de traînée pour différents régimes hydrauliques

Propriété	Unité	Méthode de calcul
Matières en suspension	g L^{-1}	$\text{MES} = \frac{(masse\ filtre + ech\ \sec s) - masse\ filtre}{Volume\ filtré\ (ml)} X\ 1000$
Pourcentage d'enlèvement (exemple des MES)	%	$\%\text{enl.} = \frac{[MES\ brut] - [MES\ final]}{[MES\ brut]} X\ 100$
Rapport $V_{S/L}$ • Décantation : $V_{S/L} < 0$ • Flottation : $V_{S/L} > 0$	sans unité	$V_{S/L} = \frac{Volume\ fraction\ solide}{Volume\ fraction\ \text{liquide}}$
Siccité	% ou g kg^{-1}	$\text{Siccité} = \frac{masse\ ech\ \sec}{masse\ ech\ humide} X\ 1000$
Solides totaux	% ou g L^{-1}	$\text{ST} = \frac{masse\ ech\ \sec(g)}{Volume\ ech\ humide(ml)} X\ 1000$

ANNEXE C

Teneurs limites de la classification C-P-O sur les Matières Résiduelles Fertilisantes

Tableau C.1 Teneurs limites en contaminants chimiques (Catégories C) (MDDEP, 2004)

Contaminants	Unités	Teneurs limites	
		Catégorie C1	Catégorie C2
Éléments considérés essentiels ou bénéfiques aux plantes ou aux animaux			
Arsenic (As)	mg kg^{-1} (b.s.)	13	40
Cobalt (Co)	mg kg^{-1} (b.s.)	34	150
Chrome (Cr)	mg kg^{-1} (b.s.)	210	1060
Cuivre (Cu)	mg kg^{-1} (b.s.)	400	1000
Molybdène (Mo)	mg kg^{-1} (b.s.)	5,0	20
Nickel (Ni)	mg kg^{-1} (b.s.)	62	180
Sélénium (Se)	mg kg^{-1} (b.s.)	2,0	14
Zinc (Zn)	mg kg^{-1} (b.s.)	700	1850
Autres éléments			
Cadmium (Cd)	mg kg^{-1} (b.s.)	3,0	10
Mercure (Hg)	mg kg^{-1} (b.s.)	0,8	5
Plomb (Pb)	mg kg^{-1} (b.s.)	150	300
Dioxines et furanes	ng EQT kg^{-1}	17	50

(1) Pour être considéré de catégorie C1, tous les paramètres doivent respecter les critères C1. Pour être considéré de catégorie C2, tous les paramètres doivent respecter les critères C2 et au moins un paramètre doit excéder le critère C1. Si on n'exige pas d'analyse pour un contaminant chimique selon le tableau 6.1, la teneur est réputée être inférieure à la limite C1. La classification se base sur la valeur moyenne des analyses réalisées au cours des 12 derniers mois.
(2) La limite de charge des résidus C2 est de 22 t (b.s.)/ha/5 ans.
(3) La teneur limite est portée à 1 500 mg Cu/kg pour les résidus > 2,5 % P2O5 b.s. et pour les biosolides municipaux provenant d'étangs.
(4) Les ACM dont le ratio PN/Zn > 0,027 ou le ratio PN/Cd > 2,5 (%ÉCC/ mg métal/kg) sont également considérés C2, suivant les critères de la norme BNQ (1997) sur les ACM.
(5) Équivalents toxiques internationaux (EQT) de l'OTAN.
(6) Une MRF contenant entre 51 et 100 ng EQT/kg de dioxines et de furannes peut faire l'objet d'une valorisation non agricole.

Tableau C.2 Critères de qualité des résidus relativement aux catégories P (MDDEP, 2007)

Résidu	Option de catégorie P1	Options de categories P2
Résidu contaminé par : • Eaux usées municipales ou domestiques • Matières fécales humaines • Fumiers • Résidus ou fumiers d'abattoirs[1] • Cadavres d'animaux[1] • Résidus d'œufs	a) Salmonelles non détectées dans 10g humides, pour les résidus ayant une siccité ≥ 15% (ou dans 50g humides pour les autres résidus) **et** séchage à une température minimale de 80 °C **et** obtention d'une siccité ≥ 92 %. b) Toute autre combinaison équivalente selon le USEPA pour satisfaire les exigences de la classe A en termes de réduction des pathogènes (incluant l'analyse obligatoire des salmonelles) et d'attraction de vecteurs.	a) Chaulage à pH ≥ 12 pendant un minimum de 2 heures **et** maintien à pH ≥ 11,5 pendant un minimum de 22 heures[3]. b) *E. coli* < 2 000 000 NPP/g (b.s.)[4] **et** traitement biologique aérobie **et** taux d'assimilation de O2 ≤ 1 500 mg O2/kg mat. organique/heure. c) *E. coli* < 2 000 000 NPP/g (b.s.)[4] **et** incorporation du résidu au sol en moins de 6 heures[5]. d) *E. coli* < 2 000 000 NPP/g (b.s.)[4] **et** traitement biologique **et** âge de boues ≥ 20 jours. e) *E. coli* < 2 000 000 NPP/g (b.s.)[4] **et** biosolide d'un étang non vidangé depuis ≥ 4 ans. f) Salmonelles non détectées dans 10g humides, pour les résidus ayant une siccité ≥ 15% (ou dans 50 g humides pour les autres résidus) **et** catégorie d'odeur O1 et O2. g) Toute autre combinaison équivalente selon le USEPA pour satisfaire les exigences de la classe B en termes de réduction des pathogènes et d'attraction de vecteurs
Composts	Salmonelles non détectées dans 10g humides, pour les résidus ayant une siccité ≥ 15% (ou dans 50g humides pour les autres résidus) **et** respect d'un des critères de maturité suivants selon les méthodes de la norme CAN/BNQ 0413-200 : a) Taux d'assimilation de O_2 ≤ 400 mg/kg matière organique/heure **ou** b) Taux d'évolution du CO_2 ≤ 4 mg C-CO_2/g matière organique/jour **ou** c) Augmentation de la température du compost au-dessus de la température ambiante < 8°C (test d'autoéchauffement)	*E. coli* < 2 000 000 NPP/g (b.s.)[4] **et** taux d'assimilation de O_2 ≤ 1 500 mg/kg matière organique/heure[6] **et** le produit doit avoir subi un procédé de compostage.
Biosolides papetiers (non contaminés par des matières fécales)	Salmonelles non détectées dans 10g humides, pour les résidus ayant une siccité ≥ 15% (ou dans 50g humides pour les autres résidus)[2] **et** attestation écrite	Attestation écrite du responsable du service de l'environnement de la papetière à savoir qu'aucune eau usée municipale ou domestique n'est

	du responsable du service de l'environnement de la papetière à savoir qu'aucune eau usée municipale ou domestique n'est déversée dans le système de traitement des eaux usées industrielles.	déversée dans le système de traitement des eaux usées industrielles.
Autres résidus (non contaminés par des matières fécales)	Attestation écrite du générateur à savoir que le résidu n'est pas contaminé par des matières fécales humaines ou animales.	Sans objet.

(1) Pour les fumiers, l'épandage agricole ou sylvicole n'est pas assujetti à un CA. L'épandage de matières contaminées par des cadavres de ruminants est interdits par le REA (article 29.1).
(2) Cas particulier : un biosolide papetier non contaminé par des matières fécales humaines, et assorti de l'attestation requise à cet effet, sera considéré de catégorie P1 s'il y a absence de salmonelle dans au moins les deux tiers des échantillons analysés au cours des 12 derniers mois.
(3) Tous les résidus doivent avoir atteint au moins un pH de 12. Il est possible que le pH diminue par la suite, ce qui peut entraîner une nouvelle croissance microbienne et la génération d'odeurs nauséabondes. Il est donc conseillé de pratiquer le chaulage le plus rapidement possible et de maintenir le pH élevé par la suite.
(4) NPP : nombre le plus probable. Utiliser la valeur médiane (et non la moyenne arithmétique).
(5) L'outil aratoire doit être assez efficace pour permettre une bonne incorporation. Le chisel n'est donc pas approprié. Les techniques d'incorporation permettant une réduction marquée des odeurs sont acceptables.
(6) Si le taux d'assimilation de O_2 est > 400 mg/g matière organique/heure, il s'agit d'un produit non-mature.

Tableau C.3 Catégories d'odeurs (MDDEP, 2007)

O1 (peu odorant)[1, 2]	O2 (malodorant)[1, 3]	O3 (fortement malodorant)[1, 4]	HC (hors catégorie)[1, 4]
• Poussières de cimenteries • Cendres de bois • Boues de chaux de papetières • Résidus magnésiens • Autres amendements calciques ou magnésiens non putrescibles • Composts (matures) • Feuilles mortes • Écorces • Biosolides papetiers et résidus de désencrage à C/N ≥ 70.	• Biosolides municipaux – étangs non vidangés depuis ≥ 4 ans • Biosolides municipaux séchés[5] • Biosolides municipaux – traitement à la chaux • Biosolides d'abattoirs chaulés • Biosolides papetiers ayant une C/N ≥ 50 et < 70 et non issu d'un procédé kraft • Biosolides papetiers provenant d'étangs non vidangés depuis ≥ 4 ans • Biosolides papetiers – traitement acide	• Biosolides municipaux – usines – traitement biologique • Biosolides d'abattoirs chaulés • Biosolides papetiers ayant une C/N < 50, sans traitement acide, ne provenant pas d'étangs avec accumulation prolongée et non issus d'un procédé kraft • Biosolides papetiers issus d'un procédé kraft ayant une C/N ≥ 50 et < 70 • Lactosérum • Lait déclassé • Résidus de pomme de terre • Rognures de gazon	• Biosolides municipaux provenant de digesteurs anaérobies qui sont déshydratés à l'aide de centrifugeuses haute vitesse, sauf ceux désodorisés par compostage, chaulage ou séchage thermique • Biosolides papetiers issus de procédés kraft, avec un C/N<50

(1) Les catégories peuvent être révisées dans certains cas selon des tests d'olfactométrie. Cela peut être particulièrement indiqué si il y a un procédé de désodorisation peu connu. Pour les MRF non mentionnées, la catégorie sera déterminée par olfactométrie ou par analogie, au cas par cas, par les directions régionales concernées. S'il y a ambiguïté entre 2 catégories possibles, prendre celle qui est la moins limitante. Par exemple un biosolide papetier à faible C/N et issu d'un procédé kraft, mais provenant d'un étang non vidangé depuis > 4 ans, sera considéré O2 plutôt que "hors catégorie".
(2) O1 : odeur < fumier solide de bovins laitiers.
(3) O2 : odeur semblable au fumier solide de bovins laitiers.
(4) O3 : odeur > fumier solide de bovins laitiers, mais ≤ lisier de porcs ; HC : odeur > lisier de porcs.
(5) Les biosolides municipaux séchés ou granulés doivent être protégés de l'humidité pour éviter la recroissance microbienne et conserver leur statut O2.

ANNEXE D

Caractéristiques des lisiers bruts

Tableau D.1 Teneurs moyennes pour différents éléments des lisiers bruts de veau et de vache-génisse

Paramètres	Unités	Lisier veau	Moyenne des Lisiers vache-génisse
pH	-	7,45	7,38
POR	mV	-44,7	-469
ST	g L^{-1}	8,26	76,7
MES	g L^{-1}	2,51	33,3
Ptot	mg L^{-1}	281	616
P-PO4	mg L^{-1}	141	184
P-org	mg L^{-1}	140	432
N-NTK	mg L^{-1}	1160	2785
N-NH4+	mg L^{-1}	941	1923
N-org	mg L^{-1}	219	862
Al	mg L^{-1}	0,88	18,2
As	mg L^{-1}	0,00	0,09
B	mg L^{-1}	0,73	n.d.
Ba	mg L^{-1}	0,51	1,27
Be	mg L^{-1}	0,00	0,00
Ca	mg L^{-1}	101	1445
Cd	mg L^{-1}	0,00	0,04
Co	mg L^{-1}	0,01	0,03
Cr	mg L^{-1}	n.d.	0,19
Cu	mg L^{-1}	0,10	7,44
Fe	mg L^{-1}	2,55	44,2
K	mg L^{-1}	2242	2410
Mg	mg L^{-1}	51,8	463
Mn	mg L^{-1}	0,65	14,0
Mo	mg L^{-1}	0,03	0,31
Na	mg L^{-1}	383	452
Ni	mg L^{-1}	0,00	0,07
Pb	mg L^{-1}	0,00	0,04
S	mg L^{-1}	185	380
Se	mg L^{-1}	0,07	0,22
Zn	mg L^{-1}	2,17	23,1

ANNEXE E

Volumes des phases de solides flottés, du liquide et de solides décantés au cours des essais de flottation étudiés

Tableau E.1 Volumes des phases des essais A-POL

Volumes des phases (mL)	Témoin sans polymère	Essais A-POL-2					Essais A-POL-3		Essais A-POL-2				
		Conc. Zetag 7557							Conc. Zetag 7689				
		(% v v^{-1})							(% v v^{-1})				
		5	10	13	17	20	1	5	5	10	13	17	20
Solides flottés	0	354	482	436	121	460	149	85,3	0	425	373	523	
Liquide	940	674	606	685	1096	718	858	1003	1047	660	757	694	Tr[10]
Solides décantés	231	20,4	0,14	9,04	0,48	38,8	1,13	0,14	1,13	3,82	0	0	

Tableau E.2 Volumes des phases des essais A4-TAM

Volumes des phases (mL)	Essais A4-TAM		
	NT	T1	T2
Solides flottés	331	0	165
Liquide	922	1070	948
Solides décantés	9,04	103	59,6

[10] Tr : Trouble. Dans ce cas, soit il est impossible de distinguer une quelconque séparation S/L au moment de l'échantillonnage, soit le lisier ne peut être échantillonné car les flocs, trop fragiles, se cassent et se mélangent directement au liquide.

Tableau E.3 Volumes des phases des essais A-TEM à 18°C et 22°C

Volumes des phases	Témoin sans polymère		Essais A-TEM	
(mL)	T = 18°C	T = 22°C	T = 18°C	T = 22°C
Solides flottés	0	0	0	448
Liquide	981	965	1007	721
Solides décantés	155	192	165	3,82

Tableau E.4 Volumes des phases des essais A-FLO

Volumes des phases	Témoin sans polymère	Essais A-FLO			
(mL)	t = 24 h	t = 4 h	t = 8 h	t = 12 h	t = 24 h
Solides flottés	0	0	0	0	242
Liquide	1100	1087	1087	1070	925
Solides décantés	80,3	86,8	86,8	103	6,06

Tableau E.5 Volumes des phases des essais B-POL

Volumes des phases (mL)	Témoin sans polymère	Essais B-POL-2					Essais B-POL-3	
		Conc. Zetag 7654 (% v v^{-1})						
		5	10	13	17	20	2	4
Solides flottés	0	0	373	383	404	551	153	436
Liquide	522	571	513	687	772	757	507	591
Solides décantés	526	477	244	103	86,8	0	388	103

Tableau E.6 Volumes des phases des essais B-TAM

Volumes des phases (mL)	Essais B1-TAM			Essais B2-TAM		
	NT	T2	T3	NT	T2	T3
Solides flottés	496	147	0	654	Tr[10]	Tr[10]
Liquide	631	953	820	468		
Solides décantés	3,81	30,5	310	9,04		

Tableau E.7 Volumes des phases des essais B-TEM à 14°C et 22°C

Volumes des phases (mL)	Témoin sans polymère		Essais B-TEM	
	T = 14°C	T = 22°C	T = 14°C	T = 22°C
Solides flottés	0	0	0	500
Liquide	737	696	436	600
Solides décantés	310	477	694	0

Tableau E.8 Volumes des phases des essais B-AGE

Volumes des phases (mL)	Témoin sans polymère		Essais B-AGE			
	Φ = 7 jrs	Φ = 27 jrs	Φ 7 jrs		Φ = 27 jrs	
Solides flottés	306	Tr[10]	730	730	730	674
Liquide	764		570	570	561	617
Solides décantés	59,6		9,04	9,04	17,7	17,7

Tableau E.9 Volumes des phases des essais B-FLO

Volumes des phases (mL)	Témoin sans polymère	Essais B-FLO			
	t = 48 h	t = 11 h	t = 27 h	t = 34 h	t = 48 h
Solides flottés	0	Tr[10]	740	740	691
Liquide	306		459	477	526
Solides décantés	824		17,7	0	0

Tableau E.10 Volumes des phases des essais D-POL

Volumes des phases (mL)	Témoin sans polymère	Essais D-POL-2					Essais D-POL-2				
		Conc. Zetag 7654 (% v v^{-1})					Conc. Percol 765 (% v v^{-1})				
		5	10	13	17	20	5	10	13	17	20
Solides flottés	0	0	Tr	0	520	300	0	800	750	850	450
Liquide	400	400	Tr	250	420	500	150	240	390	400	580
Solides décantés	600	650	Tr	900	320	450	900	60	10	0	0

Tableau E.11 Volumes des phases des essais D-TAM

Volumes des phases (mL)	Lisier D1			Lisier D2		
	NT	T3	T8	NT	T3	T8
Solides flottés	300	0	100	800	0	800
Liquide	600	550	900	400	150	400
Solides décantés	90	650	5	5	1050	5