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

DÉVELOPPEMENT D'UNE FILIÈRE PHYSICO-CHIMIQUE DE TRAITEMENT DU LISIER BOVIN

Par
Dikenane Kombila

Thèse de doctorat
Doctorat en Sciences de l'eau

Jury d'évaluation

Directeur de recherche:	Jean-François Blais
Codirecteur de recherche:	Guy Mercier
Codirecteur de recherche:	Patrick Drogui
Examinateur interne:	Satinder K. Brar
Examinateur externe:	Peter Jones Université de Sherbrooke
Examinateur externe:	Stéphane Godbout IRDA

Décembre 2013

© Droits réservés de Dikenane Kombila

REMERCIEMENTS

En priorité, je transmets mes sincères remerciements à Jean François Blais, Guy Mercier et Patrick Drogui, mes directeur et codirecteurs de recherche. Merci d'avoir accepté ma candidature au doctorat en science de l'eau au sein d'une équipe dynamique et de m'avoir offert l'opportunité de mener à bien ce projet de recherche. Grâce à votre constante disponibilité, vos enseignements et vos conseils, j'ai pu évoluer en toute confiance dans le cadre idéal pour l'accomplissement du programme de doctorat en science de l'eau.

J'adresse mes remerciements à Satinder K. Brar, Stéphane Godbout et Peter Jones, pour avoir accepté d'examiner et d'évaluer mes travaux de recherche.

Je remercie également Lan Huong Tran, Nam Tran, ainsi que Myriam Chartier pour leur implication, leur disponibilité et leur participation active à ce projet.

Je souhaite également remercier tous ceux qui m'ont apporté leur aide au cours de ce doctorat, Suzanne Dussault et Johanne Desrosiers au niveau administratif.

Merci à Gilles L'Heureux qui m'a donné accès à sa ferme pour l'échantillonnage et la collecte de données tout au long du projet de recherche.

Un grand merci à tous mes collègues de laboratoire et amis, Jean Robert Gnepe, Zied Djedidi, François Zaviska, Romain Barbaroux, Nicolas Reynier pour leur aide et leurs idées.

À mes frères et amis qui m'ont soutenu, encouragé, conseillé pendant toute la durée de mes études, Endzo, Ghislain, Ulrich, Divoungui, Frederic, Thierry, Marc, Larry, Yannick, Assoume, et les autres. Un profond merci à la grande famille ainsi qu'à mes frères des charbonnages.

Merci à ma famille, en particulier à mon père et à ma mère qui m'ont permis de faire des études supérieures et de poursuivre mes études au Québec. Merci à mon grand frère Koumba et ma grande sœur Matamba pour leur soutien et leurs encouragements constants.

Je souhaite remercier mon épouse, Zainab Baghagha, qui m'a encouragé, soutenu et aidée.

À mes fils Koumba et Kuéli, vous êtes la source de motivation et de bonheur qui illumine chaque journée de mon existence.

RÉSUMÉ

L'élevage intensif est un secteur prospère en Amérique du Nord qui, en plus de consommer eau et énergie, apporte son lot de rejets potentiellement nocifs pour l'environnement. En effet, l'agrandissement des exploitations et la progression de l'élevage intensif entraînent des surplus de fertilisants par rapport à la demande locale. Le surplus de nutriments présents dans le lisier se retrouve dans la nature après épandage, ce qui altère la qualité des eaux souterraines, des eaux de surface, de l'air et des sols

Au Canada, la gestion du lisier sous forme liquide tend à se développer parallèlement à l'agrandissement des exploitations. Sous la forme liquide, le lisier est plus facile à manipuler avec de la machinerie. La gestion du lisier sous forme liquide nécessite de grandes quantités d'eau généralement potable (eau de lavage). La dilution provoque une forte augmentation du volume du lisier. Il faut donc plus d'espace de stockage et plus de moyens de transport pour l'épandage. Au Québec, la quantité totale de lisier produite est de 25 Mt an^{-1}. Il est donc pertinent de s'intéresser au traitement du lisier bovin. Le lisier a une valeur agronomique importante, car il constitue un engrais organo-minéral possédant d'excellentes qualités fertilisantes.

La quasi-totalité du lisier produit sous forme liquide fait l'objet d'épandage au champ. Des quantités importantes de matières en suspension (MES), d'azote (N) et de phosphore (P) notamment, provoquent une diminution de l'oxygène disponible dans les cours d'eau. Les épisodes de contamination des étendues d'eau par des micro-algues toxiques, directement liées à l'eutrophisation des lacs, ne laissent pas les gouvernements indifférents face aux nouveaux défis qu'impose la gestion des cours d'eau.

Le P est l'élément fertilisant qui pause le plus de problème. Dans certaines régions, l'apport de P au sol par épandage de lisier est trop important par rapport au besoin des cultures. Il faut donc transporter ces surplus vers des zones ayant des besoins en P, ce qui occasionne des coûts de transport élevés.

Dans l'objectif de résoudre cette problématique qui devient un enjeu pour la santé humaine, plusieurs recherches tentent de mettre au point des technologies capables de diminuer la charge polluante du lisier sous forme liquide tout en conservant ses qualités fertilisantes. Quelques procédés ont fait leurs preuves avec le lisier porcin. Les trois principales catégories de traitements exploités, font appel a des procédés physiques, biologique et/ou physico chimique pouvant être combinés ou non. Toutefois, la plupart des technologies de traitement disponibles pour le lisier bovin sont actuellement en cours d'étude ou trop coûteuses pour être exploitées.

La présente étude a pour objectif central **la mise au point d'un procédé de séparation solide/liquide (S/L) du lisier bovin sous sa forme liquide**. La problématique exige un procédé simple, se déroulant en deux ou trois étapes, il devra facilement s'adapter au fonctionnement de l'exploitation, ou être implanté à moindre coût, sur une installation de traitement existante. La filière étudiée consiste notamment en une séparation par tamisage, suivie d'une coagulation des MES par électrocoagulation en utilisant des électrodes de fer ou par ajout de polymères.

Dans le cadre des présents essais, une ferme près de Québec, spécialisée dans la production de vaches génisses et laitières a servi de source d'échantillonnage. La première étape du procédé reposait sur un tamisage en séquence composé de deux tamis de maillage 3,0 et 0,5 mm. Un

système de deux tamis superposés était placé sur un agitateur à secousses. Initialement, le lisier présentait une concentration moyenne de 8,6% solides totaux (ST). Après 15 min d'agitation sur un tamis à secousses, 59 ± 2% des solides ont été récupérés sur les tamis. Le solide ainsi récupéré, constitué principalement de litière (paille) et de résidus d'alimentation, présentait une siccité de 12 ± 1% ST.

L'étape suivante a consisté en la mise au point d'une procédure de coagulation/floculation des particules présentes dans la fraction liquide issue de l'étape de tamisage. Le polymère synthétique commercial Zetag 7654 a été sélectionné pour ses caractéristiques bien adaptées au lisier bovin. Il s'agit d'un polymère cationique de poids moléculaire élevé et de densité de charge très élevée. Au terme de l'étape précédente, le lisier récupéré (6 ± 1% ST) a été dilué à 2% ST, puis mélangé au polymère dans une concentration de 20% (v/v) d'une solution à 1 g L^{-1}. Après un temps d'agitation de 15 min, le mélange a été tamisé sur un tamis de 0,5 mm. L'étape de floculation a généré un liquide final ayant les caractéristiques suivantes: ST: 1,4 ± 0,3%; MES: 3,1 ± 1,1 g L^{-1}; P_{tot}: 0,12 ± 0,01 g L^{-1} et N-NTK: 1,4 ± 0,1 g L^{-1}. Les taux d'enlèvement des solides et des nutriments à partir du lisier brut sont de 92 ± 6% ST; 76 ± 3% P_{tot} et 57 ± 5% N-NTK. Cette filière de traitement a été évaluée en triplicata et en mode continu à l'échelle pilote.

Parallèlement aux traitements effectués avec des polymères, des essais ont été menés sur l'emploi de l'électrocoagulation avec des électrodes de fer. Le lisier issu de la première étape de tamisage a été dilué pour atteindre une concentration de 2% ST. Par la suite, il a été placé dans une cellule d'électrolyse de 1,7 L de volume utile à l'intérieur de laquelle un courant ayant une intensité de 4 A traversait huit électrodes de fer et ce, pendant 30 min. Le lisier ainsi traité a ensuite subi une étape de décantation de 2 h. Les résultats ont montré que 70 à 75% des ST sont ainsi enlevés à partir du lisier dilué. Le liquide obtenu présentait des concentrations de 0,3 g MES L^{-1} et de 6,5% ST. Bien que prometteur, les simulations concernant les quantités de fer nécessaires pour l'exploitation d'un tel procédé à l'échelle industrielle montrent que le procédé serait trop coûteux selon les conditions actuelles du marché.

En assumant que la majorité du P est associée aux particules présentes dans le lisier, il peut être déduit qu'une bonne partie de la problématique liée à l'épandage du lisier sur les terres surchargées en nutriments pourrait trouver une solution au travers de tels procédés.

L'abaissement des coûts reste un facteur limitant pour certains paramètres déterminant de l'efficacité des technologies (coûts des matériaux et réactifs). Afin de limiter l'utilisation de grandes quantités d'eau, nécessaires à la dilution du lisier pré-tamisé, des essais en boucle (réutilisation du liquide final comme diluant avant l'étape de floculation) ont été menés au laboratoire, ainsi qu'à l'échelle pilote.

L'un des objectifs du projet était également de remplacer le Zetag par un polymère organique naturel, afin d'éviter les limitations légales liées à l'utilisation des amendements issus de traitements utilisant des polymères synthétiques. Le chitosan, bien que coûteux, est un polymère organique naturel efficace.

Les travaux réalisés contribuent à l'avancée des connaissances concernant la mise au point de procédés de traitement appliqués au lisier bovin. Ces derniers sont très peu nombreux contrairement à ceux appliqués au lisier porcin. Cette étude présente un nouveau regard en exploitant l'utilisation de polymères à grande échelle tout en offrant faibles coûts, efficacité de traitement et facilité de manipulation. Elle permet d'entrevoir le traitement du lisier bovin selon

des approches jamais ou peu évaluées auparavant, à savoir: l'utilisation de l'électrocoagulation et de polymères comme coagulants sur un résidu d'exploitation agricole à forte charge organique et particulaire. L'approche est de plus novatrice qu'elle a démontré l'efficacité du chitosan comme agent floculant au sein d'une filière de séparation S/L du lisier bovin. Elle s'aligne avec une série de travaux très récents ou en cours dont l'objectif est l'établissement de technologies de traitement spécifiquement dédiés au lisier bovin.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS iii
RÉSUMÉ v
TABLE DES MATIÈRES ix
Chapitre 1 REVUE DE LITTÉRATURE 5
1.1 Caractéristiques du lisier bovin 5
1.1.1 Éléments nutritifs 6
1.1.2 Charge fertilisante des effluents bovins 10
1.1.3 Matière organique 12
1.1.4 Microorganismes 13
1.1.5 Métaux lourds 13
1.1.6 Médicaments 15
1.2 Problématique de la gestion des rejets de lisier 16
1.2.1 Contamination des eaux 16
1.3 Stratégie environnementale de gestion du lisier 19
1.3.1 Diminution de la charge en éléments fertilisants du lisier 19
1.3.2 Diminution du volume de lisier produit 19
1.4 Technologies de traitement existantes 20
1.4.1 Classement et caractéristiques des technologies existantes 20
1.4.2 Procédés physiques 22
1.4.3 Procédés biologiques 25
1.4.4 Procédés physico-chimiques 28
1.4.5 Procédés thermiques 29
1.4.6 Technologies de traitement commercialisables 29
1.5 Traitement du lisier bovin par coagulation/floculation 33
1.5.1 Définitions et mécanismes 33
1.5.2 Phénomène de coagulation 36
1.5.3 Phénomène de floculation 37
1.5.4 Nature et particularités des polymères synthétiques 38
1.5.5 Polymères organiques naturels 41
1.6 Traitement du lisier bovin par électrocoagulation 43
1.7 Valorisation des sous-produits de traitement du lisier 47
1.7.1 Devenir des différentes fractions après traitement 47
1.7.2 Spécificité des normes d'épandage pour les lisiers traités à l'aide de polymères 48
1.8 Critères d'évaluation des technologies 50
1.8.1 Enlèvement des MES et des ST de la fraction liquide 50
1.8.2 Siccité de la fraction solide 51
1.8.3 Teneur en P_{tot} des fractions solide et liquide 51
1.8.4 Teneur en N-NTK et en $N\text{-}NH_4$ des fractions liquide et solide 51
1.8 Hypothèses et objectifs 52
Chapitre 2 MATÉRIELS ET MÉTHODES 53
2.1 Échantillonnage du lisier 53

2.2 Séparation du lisier par pré-tamisage 55
2.3 Floculation du lisier pré-tamisé à l'aide de polymères 57
2.3.1 Sélection du polymère 57
2.3.2 Détermination de la concentration optimale de polymère 58
2.3.3 Détermination de la concentration optimale de ST 59
2.3.4 Essais de floculation avec des polymères organiques naturels 59
2.3.5 Évaluation du chitosan comme floculant du lisier bovin 60
2.4 Validation de la filière utilisant les polymères 61
2.4.1 Étude de reproductibilité de la filière au laboratoire 61
2.4.2 Essais en mode continu de la filière au laboratoire 62
2.4.3 Étude de la filière à l'échelle pilote 62
2.5 Séparation du lisier par électrocoagulation 67
2.5.1 Détermination du mode optimal de configuration 67
2.5.2 Optimisation de la concentration en ST 69
2.5.3 Optimisation de l'intensité du courant électrique 69
2.5.4 Optimisation de la durée de l'électrocoagulation 69
2.5.5 Optimisation de la durée de la décantation 70
2.5.6 Électrocoagulation du lisier bovin à l'échelle pré-industrielle 70
2.6 Mesures analytiques 71
2.7 Étude technico-économique 72
2.7.1 Schéma de procédé 72
2.7.2 Définition des paramètres opératoires et d'exploitation 72
2.7.3 Bilans massique et volumique 74
2.7.4 Dimensionnement des équipements 75
2.7.5 Coûts en capitaux 75
2.7.6 Coûts directs d'opération 77
2.7.7 Coûts indirects et généraux 80
2.7.8 Analyse de flux monétaire 82
Chapitre 3 RÉSULTATS ET DISCUSSION 85
3.1 Approvisionnement en lisier et séquence optimale de pré-tamisage 85
3.2 Floculation du lisier pré-tamisé à l'aide de polymères 93
3.2.1 Sélection du polymère synthétique de référence 93
3.2.2 Paramètres optimaux pour la floculation à l'aide des polymères synthétiques 95
3.2.3 Essais de floculation à l'aide de polymères organiques naturels 99
3.2.4 Évaluation du chitosan comme floculant du lisier bovin au sein d'un procédé de séparation S/L du lisier bovin 100
3.2.5 Étude de reproductibilité de la filière au laboratoire 105
3.2.6 Essais en mode continu de la filière au laboratoire 108
3.2.7 Étude de la filière à l'échelle pilote 111
3.3 Détermination des conditions optimales d'électrocoagulation 120
3.3.1 Sélection du type de configuration 120
3.3.2 Optimisation de la concentration en ST 121
3.3.3 Optimisation de l'intensité du courant électrique 122
3.3.4 Optimisation de la durée de l'électrocoagulation 123
3.3.5 Optimisation de la durée de la décantation 125

3.3.6 Électrocoagulation du lisier bovin à l'échelle pré-industrielle 128
3.4 Analyse technico-économique de la filière utilisant les PAMs 134
3.4.1 Schéma du procédé 134
3.4.2 Bilan massique 137
3.4.3 Coûts et revenus totaux d'exploitation du procédé 138
3.4.4 Analyse de flux monétaire 139
Chapitre 4 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS 143
BIBLIOGRAPHIE 151

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 Informations générales sur les lisiers bovins du Québec 6

Tableau 1.2 Caractéristiques des lisiers et fumiers de vaches laitières 7

Tableau 1.3 Teneurs ($kg\ t^{-1}$) moyennes, minimales et maximales du contenu en minéraux d'engrais de ferme 10

Tableau 1.4 Charges fertilisantes d'effluents provenant d'élevages bovins au Québec pour l'année 2003 11

Tableau 1.5 Résumé des traitements expérimentaux d'ultrafiltration et de microfiltration appliqués au lisier 23

Tableau 1.6 Synthèse des détails techniques et économiques des technologies commercialisables 31

Tableau 1.7 Domaines d'application de floculant en fonction de leur charge et de leur PM 40

Tableau 2.1 Conditions expérimentales pour la détermination de la séquence optimale de tamis destinée à l'étape de pré-tamisage (maillage en mm) 55

Tableau 2.2 Principales caractéristiques des PON testés 60

Tableau 3.1 Siccité (% p/p) des fractions issues de l'étape de pré-tamisage pour la séquence 1 (3,18 mm – réceptacle); t = 15 min; vol = 1000 mL 87

Tableau 3.2 Masses humides (g) des fractions issues de l'étape de pré-tamisage pour la séquence 1 (3,18 mm – réceptacle); t = 15 min; vol = 1000 mL 87

Tableau 3.3 Siccité (% p/p) des fractions issues de l'étape de pré-tamisage pour la séquence 2 (3,18 mm – 1 mm – réceptacle); t = 15 min; vol = 1000 mL 87

Tableau 3.4 Masses humides (g) des fractions issues de l'étape de pré-tamisage pour la séquence 2 (3,18 mm – 1 mm – réceptacle); t = 15 min; vol = 1000 mL 88

Tableau 3.5 Siccité (% (p/p)) des fractions issues de l'étape de pré-tamisage pour la séquence 3 (3,18 mm – 0,5 mm – réceptacle); t = 15 min; vol = 1000 mL 88

Tableau 3.6 Masses humides (g) des fractions issues de l'étape de pré-tamisage pour la séquence 3 (3,18 mm – 0,5 mm – réceptacle); t = 15 min; vol = 1000 mL 89

Tableau 3.7 Siccité (% p/p) des fractions issues de l'étape de pré-tamisage à l'échelle préindustrielle; séquence 4 (5 mm – 2 mm – 0,5 mm – réceptacle); t = 15 min; vol = 40 L 90

Tableau 3.8 Masses humides (kg) des fractions issues de l'étape de pré-tamisage à l'échelle préindustrielle; séquence 4 (5 mm – 2 mm – 0,5 mm – réceptacle); t = 15 min; vol = 40 L 90

Tableau 3.9 Teneurs moyennes en P_{tot} et N-NTK pour le lisier brut et la fraction liquide tamisée lors des essais de pré-tamisage 91

Tableau 3.10 Tests de floculation réalisés avec différents polymères synthétiques 94

Tableau 3.11 Tests de floculation et de séparation S/L avec différentes proportions de PAM[a] 96

Tableau 3.12 Tests de floculation et de séparation S/L sur différentes concentrations en solides de lisier pré-tamisé 98

Tableau 3.13 Qualité[a] des flocs obtenus lors des tests de floculation et de séparation S/L avec les PON à une concentration de 15% (v/v) de polymère (2 g L^{-1}) 100

Tableau 3.14 Caractéristiques des fractions d'intérêt après traitement avec chitosan (10 g L^{-1}) comme PON 101

Tableau 3.15 Caractéristiques des fractions d'intérêt après traitement utilisant le chitosan (8 g L^{-1}) comme PON 102

Tableau 3.16 Caractéristiques des fractions d'intérêt après traitement utilisant le chitosan (5 g L^{-1}) comme PON 103

Tableau 3.17 Caractéristiques des fractions d'intérêt après traitement utilisant le chitosan (2 g L^{-1}) comme PON 104

Tableau 3.18 Caractéristiques des fractions solides et liquides issues des étapes de pré-traitement du lisier bovin à l'aide d'un PAM (Zetag 7654 à 1 g L^{-1}) lors des tests de reproductibilité 106

Tableau 3.19 Caractéristiques des fractions solides et liquides issues des étapes de floculation du lisier bovin à l'aide d'un PAM (Zetag 7654 à 1 g L^{-1}) lors des tests de reproductibilité 107

Tableau 3.20 Bilan massique et volumique des essais DK-70, DK-71 et DK-72 108

Tableau 3.21 Caractéristiques des fractions solides et liquides issues de l'étape de pré-traitement du lisier bovin à l'aide d'un PAM lors des essais en mode continu 109

Tableau 3.22 Caractéristiques des fractions solides et liquides issues des étapes de pré-traitement du lisier bovin à l'aide d'un PAM (Zetag 7654 à 1 g L^{-1}) lors des essais en mode continu 110

Tableau 3.23 Caractéristiques des fractions solides et liquides issues des étapes de pré-traitement du lisier bovin à l'aide d'un PAM lors des tests de reproductibilité au pilote 112

Tableau 3.24 Caractéristiques des fractions solides et liquides issues des étapes de floculation du lisier bovin à l'aide d'un PAM lors des tests de reproductibilité au pilote 114

Tableau 3.25 Bilan massique et volumique moyen des essais DK-126, DK-128 et DK-129 116

Tableau 3.26 Caractéristiques des fractions solides et liquides issues de l'étape 1 des essais pilotes de floculation en mode continu du lisier bovin à l'aide d'un PAM 117

Tableau 3.27 Caractéristiques des fractions solides et liquides issues de l'étape 2 des essais pilotes de floculation en mode continu du lisier bovin à l'aide d'un PAM 118

Tableau 3.28 Siccité (% p/p) des fractions solides issues de l'étape de pré-tamisage pilote lors de l'évaluation de la perte d'eau à l'air libre 120

Tableau 3.29 Caractéristiques des fractions issues des essais d'électrocoagulation en configurations MP et BP (électrodes de fer, ST = 4,5%, $t_{élec}$ = 60 min, $t_{déc}$ = 120 min) 121

Tableau 3.30 Caractéristiques des fractions issues des essais d'électrocoagulation visant à déterminer la concentration optimale de ST (électrodes de fer, mode MP, I = 3 A, $t_{élec}$ = 60 min, $t_{déc}$ = 120 min) 122

Tableau 3.31 Caractéristiques des fractions issues des essais d'électrocoagulation visant à déterminer l'intensité optimale du courant électrique (électrodes de fer, mode MP, ST = 1,7%, $t_{élec}$ = 60 min, $t_{déc}$ = 120 min) 123

Tableau 3.32 Caractéristiques des fractions issues des essais d'électrocoagulation visant à déterminer la durée optimale de l'électrocoagulation (électrodes de fer, mode MP, ST = 1,5%, I = 3 A, $t_{déc}$ = 120 min) 124

Tableau 3.33 Caractéristiques des fractions issues des essais d'électrocoagulation à forte intensité imposée (électrodes de fer, mode MP, ST = 2,2%, $t_{déc}$ = 120 min) 125

Tableau 3.34 Caractéristiques des fractions issues des essais d'électrocoagulation visant à déterminer la durée optimale de la décantation (électrodes de fer, mode MP, ST = 1,6%, I = 3A, $t_{élec}$ = 60 min) 126

Tableau 3.35 Caractéristiques des fractions issues de la séparation S/L à partir de 1 L de lisier bovin brut utilisant l'électrocoagulation du lisier tamisé dilué suivie d'une décantation 127

Tableau 3.36 Caractéristiques des fractions issues des essais complémentaires sur l'électrocoagulation (électrodes de fer, mode MP, ST = 2,0%, I = 53,7 A, $t_{élec}$ = 60 min) 128

Tableau 3.37 Bilan massique établi pour l'analyse technico-économique de la filière utilisant les PAMs 138

Tableau 3.38 Coûts et revenus totaux d'exploitation du procédé 140

Tableau 3.39 Analyse de flux monétaire 141

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 Schémas de bioréacteurs à membranes: a) bioréacteur à membranes en boucle externe, et b) bioréacteur à membranes immergées (Comeau et al., 2006) 24

Figure 1.2 Principes de la séparation du lisier par coagulation/floculation (Mottot, 2000) 34

Figure 1.3 Formation de la double couche à la surface d'une particule colloïdale 35

Figure 1.4 Théorie de DLVO de l'attraction et répulsion entre deux particules (Mottot, 2000) 36

Figure 1.5 Structure chimique d'une molécule d'acrylamide 39

Figure 1.6 Cellule d'électrocoagulation à électrodes monopolaires (MP) (Drogui et al., 2005) 44

Figure 1.7 Cellule d'électrocoagulation à électrodes bipolaires (BP) (Drogui et al., 2005) 45

Figure 2.1 Photographies des installations de la ferme M.G. L'Heureux 54

Figure 2.2 Photographies des racleuses, pompes et fosses au site d'échantillonnage 54

Figure 2.3 Photographies des équipements de tamisage au laboratoire 56

Figure 2.4 Photographies des équipements de tamisage au pilote pré-industriel 57

Figure 2.5 Photographies des équipements de tamisage à l'échelle pilote utilisant le Zetag 7654 63

Figure 2.6 Schéma du tamis tangentiel utilisé lors des essais pilotes (Lisox) 64

Figure 2.7 Photographies des fractions solides résiduelles lors des essais d'égouttage 66

Figure 2.8 Cellule d'électrocoagulation avec électrodes de fer 67

Figure 2.9 Montage d'électrocoagulation avec électrodes de fer utilisé pour le traitement du lisier bovin à l'échelle laboratoire. A: Configuration bipolaire (BP). B: Configuration monopolaire (MP) 68

Figure 2.10 Cellule électrolytique utilisée pour les tests d'électrocoagulation à l'échelle pré-industrielle 70

Figure 3.1 Lisier brut avant tamisage et résidus après tamisage par vibration, au laboratoire et au pilote 86

Figure 3.2 Tamis rotatif conçu par Environnement Matériels Objectifs 92

Figure 3.3 PAM en solution et formation d'un amas de flocs sur tamis (maillage de 0,5 mm) à partir du lisier tamisé dilué 93

Figure 3.4 Fractions solides obtenues au pilote après l'étape de pré-tamisage 113

Figure 3.5 Montage réalisé pour l'utilisation du tamis tangentiel 115

Figure 3.6 Dispositifs pour: A séchage des résidus issus du pré-tamisage; B égouttage des solides floculés 119

Figure 3.7 Photographies des lisiers après décantation lors des essais DK-16 à DK-19 123

Figure 3.8 A: Montage après électrocoagulation; B: Mousse; C et D: Solide issu de l'électrocoagulation et séparé sur tamis 130

Figure 3.9 Photographies des flocs A: issus de la floculation à l'aide des PAM; B: issus de l'électrocoagulation 132

Figure 3.10 Schéma du procédé de séparation S/L de lisier bovin utilisant les PAMs comme floculant incluant les données expérimentales 135

Figure 3.11 Schéma pour l'étude technico économique du procédé de séparation S/L de lisier bovin utilisant les PAMs comme floculant 136

Figure 4.1 Schéma de la filière de traitement suggérée pour la séparation S/L du lisier bovin utilisant l'électrocoagulation 145

Figure 4.2 Schéma de la filière de traitement suggérée pour la séparation S/L du lisier bovin utilisant les PAM comme floculant 147

LISTE DES ABBRÉVIATIONS

Ag	Argent
AGV	Acide gras volatil
BP	Bipolaire
BRM	Bioréacteur à membrane
C	Carbone
Ca	Calcium
CAAM	Montant annuel de l'amortissement
CADO	Coûts directs d'opération
CAFI	Coût annuel du financement
CAIO	Coûts indirects et généraux
CAP	Capacité de l'équipement
CAPA	Capacité annuelle de traitement
CATE	Coût d'achat des équipements
Cd	Cadmium
CDTC	Coûts directs totaux en capitaux
CFTC	Coûts fixes totaux en capitaux
CGP	Coût global du procédé (sur 10 ans)
CMAV	Marketing et ventes
COAE	Coût annuel en électricité
COBR	Coûts des brevets et redevances
COCA	Coût annuel en carburants
COEP	Coût annuel en eau de procédé
COER	Coûts annuels d'entretien et réparation
COGD	Coût annuel de gestion des déchets
COLA	Frais annuels de laboratoire
COMC	Coûts annuels en matériaux courants
COPC	Coût annuel en produits chimiques
CRED	Coût de recherche et développement
CTOP	Coûts totaux d'opération
Cu	Cuivre
DBO	Demande biochimique en oxygène
DCO	Demande chimique en oxygène
DOAM	Dotation à l'amortissement
FAAT	Coût en assurances et taxes
FADM	Frais généraux
FAMO	Période d'amortissement
FASE	Facteur de sécurité (surdimensionnement)
FASM	Avantages sociaux et marginaux
FASS	Assurances et taxes
FBRR	Brevets et redevances
FCAJ	Capacité de traitement de l'usine
FCPA	Coûts unitaires de produits chimiques
FCUE	Coût unitaire de l'électricité

FEAU	Coût unitaire de l'eau de procédé
FEFF	Facteur d'efficacité d'opération
FGAD	Frais généraux
FIMP	Imposition sur le revenu
FINF	Taux d'inflation annuel
FINT	Taux d'intérêt annuel
FJOA	Période d'opération
FLAB	Frais de laboratoire
FMAI	Entretien et réparation
FMAV	Marketing et ventes
FMCO	Matériaux courants
FMNA	Flux monétaire net annuel
FMNC	Flux monétaire net cumulatif
FNHO	Nombre d'heures d'opération par jour
FPDI	Coût unitaire du gaz naturel
FPPQ	Fédération des producteurs porcins du Québec
FRED	Recherche et développement
FROP	Fonds de roulement
FSAD	Dépenses administration
FSAM	Avantages sociaux et marginaux
FSUB	M.O. pour l'entretien
FTAC	Taux d'échange
FTDD	Transport et disposition de déchets dangereux
FTDR	Transport et disposition de déchets réguliers
FTDS	Transport et disposition de déchets spéciaux
FTES	Taux d'escompte annuel
FTMO	Coût unitaire de la main d'œuvre
FVIE	Durée de vie des équipements
GES	Gaz à effet de serre
HMW	High molecular weight (poids moléculaire élevé)
IMRE	Imposition sur le revenu
INVE	Coût total d'investissement
IRDA	Institut de Recherche et de Développement en Agroenvironnement
IVB	Indice de volume des boues
K	Potassium
M.O.	Main-d'oeuvre
m/m	Masse/masse
MDDEP	Ministère du Développement Durable, de l'Environnement et des Parcs
MEF	Ministère de l'Environnement et de la Faune
MES	Matières en suspension
Mg	Magnésium
MH	Matière humide
Mn	Manganèse
MO	Matière organique
Mo	Molybdène
MP	Monopolaire

MRF	Matière résiduelle fertilisante
MS	Matières sèches
MSECI	Marshall and Swift Equipment Cost Index
MVES	Matières volatiles en suspension
N	Azote
Na	Sodium
N-NTK	Azote total Kjeldahl
N_{org}	Azote organique
P	Phosphore
p/p	Poids/poids
PAM	Polyacrylamide
PM	Poids moléculaire
PNT	Profit net total
PON	Polymère organique naturel
PRI	Période de remboursement
P_{tot}	Phosphore total
RBAI	Revenus bruts avant imposition
REA	Règlement sur les exploitations agricoles
REEX	Revenus de traitement
REUN	Revenus unitaire de traitement
RNAI	Revenus nets totaux
RPM	Rotations par minute
S/L	Solide/liquide
SAPA	Dépenses d'administration
Se	Sélénium
Sln	Solution
SRF	Résistance spécifique à la filtration
ST	Solides totaux
TCFC	Coûts totaux fixes en capitaux
TCSC	Coûts fixes totaux en capitaux
$T_{déc}$	Temps de décantation
TEHU	Temps horaire d'utilisation de l'équipement
$T_{élec}$	Temps d'électrocoagulation
TFOR	Montant du fonds de roulement
TRI	Taux de rendement interne
TSC	Taux de succion capillaire
UFC	Unités formant des colonies
v/v	Volume/volume
VAN	Profit net actualisé
VARE	Valeur résiduelle des équipements
X	Constante de coût pour l'équipement considéré
Y	Facteur de mise à l'échelle
Zn	Zinc

INTRODUCTION

L'élevage bovin intensif est en expansion en Amérique du Nord, générant des millions de tonnes de ce résidu à haute teneur en azote (N) et en phosphore (P). Le lisier issu de l'élevage bovin est un mélange de déjections animales, de litières, d'eau de lavage et de résidus alimentaires. La gestion du lisier intègre les étapes allant de la production à la disposition et se fait principalement selon deux modes: Les rejets seront qualifiés de liquide, si la teneur en eau est supérieure à 85% et de solide si elle est en dessous de 85%. Sous cette forme, la mécanisation est facilitée, ce qui diminue les coûts initiaux, les odeurs dans les bâtiments et la quantité d'énergie nécessaire. La gestion liquide était employée pour 25% du total des déjections bovines en 2003. Elle nécessite de grandes quantités d'eau généralement potable (eau de lavage), plus d'espace de stockage et plus de moyens en transports pour l'épandage.

La gestion et l'épandage du lisier sous forme liquide entraîne, une surcharge en éléments nutritifs et en matière organique (MO) au niveau des champs. Le P est l'élément fertilisant le plus problématique. Dans certaines régions, l'apport de P au sol par épandage de lisier est trop important par rapport au besoin des cultures. Il faut donc transporter ces surplus vers des zones ayant des besoins en P. Compte tenu des règlements en vigueur et des coûts reliés au transport, l'épandage se fait toujours à proximité des lieux de production du lisier. Les sols et les cultures ne peuvent assimiler de telles quantités de nutriments, ces derniers se retrouvent donc dans les cours d'eau et les eaux souterraines. Les épisodes de contamination des étendues d'eau par les algues bleues observées ces dernières années au Québec constituent un exemple des effets néfastes qu'entraîne l'épandage des lisiers et autres matières résiduelles fertilisantes, tel que pratiqué aujourd'hui en Amérique du Nord. Se déroule alors une dégradation accélérée des sols agricoles, des lacs et des rivières. La consommation d'eau potable, la pêche, la baignade et bien

d'autres usages courant de l'eau en sont perturbés. L'application des bonnes pratiques de gestion en agriculture permet de diminuer la pression exercée sur les écosystèmes déjà lourdement touchés, mais des technologies de traitement efficaces doivent être implantées pour améliorer le type de gestion en cours. Le coût du transport du lisier liquide étant trop important, il serait intéressant de disposer d'un procédé simple et économique qui permettrait de concentrer cet élément dans une phase solide représentant une faible fraction du volume totale de lisier, rendant le coût du transport abordable.

La présente recherche vise donc le développement d'une filière performante et très économique de traitement du lisier bovin.

La première partie de cette thèse expose un résumé des connaissances concernant le lisier bovin jugées pertinentes au regard des objectifs fixés pour la présente étude. Cette section présente un survol des caractéristiques des lisiers bovins, ainsi que la présentation des différentes problématiques et autres nuisances causées par plusieurs modes de gestion appliqués au lisier bovin. La revue de littérature présente ensuite une série de technologies et de procédés applicables au traitement du lisier bovin ainsi que les critères d'évaluation utilisés pour évaluer la performance de telles technologies.

La deuxième partie décrit les essais réalisés afin d'explorer et d'optimiser les différentes approches de traitement à l'étude. Cette section présente aussi les méthodes d'analyse des échantillons, la description de l'analyse technico économique, ainsi que le matériel utilisé tout au long des travaux nécessaires à l'élaboration du procédé.

La troisième partie de cette thèse présente et discute les résultats des tests et des analyses réalisés. Les résultats des tests pour la mise au point et l'optimisation des paramètres liés aux

deux principales technologies ainsi que les paramètres sélectionnés pour l'opération des filières de traitement y sont présentés, interprétés et discutés en fonction des connaissances disponibles et des objectifs visés. Les résultats de l'analyse technico économique y sont présentés et discutés.

CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE

1.1 Caractéristiques du lisier bovin

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

La composition du lisier varie dépendamment de l'espèce, de la race, du mode de gestion et du type d'exploitation (alimentation, type de litière) (CRAAQ, 2003; Giroux et Grégoire, 2000). Au Québec, le mode d'élevage traditionnel se spécialise selon la catégorie (boucherie ou laitière), l'âge et le sexe des animaux. La production laitière est l'activité principale des éleveurs bovins au Québec (Statistiques Canada, 2007). Ce type d'exploitation est composé de vaches et de génisses laitières. Le lisier qui en résulte est donc un mélange des lisiers de vaches laitières et de vaches génisses.

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

Tableau 1.1 Informations générales sur les lisiers bovins du Québec

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

a 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 cette thèse.

b 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.

Source: Ministère de l'Environnement (2002).

1.1.1 Éléments nutritifs

Le lisier contient des composés organiques dissous ou non (polysaccharides, lipides, protéines et des acides gras volatils (AGV)), ainsi que des composés inorganiques (Garcia-Ochoa et al., 1999). Le Tableau 1.2 présente les caractéristiques du lisier et du fumier de vaches laitières (Garcia-Ochoa et al., 1999; Sager, 2007).

Tableau 1.2 Caractéristiques des lisiers et fumiers de vaches laitières

Paramètres	Minimum	Maximum
Ph	6,30	8,60
MS (%)	7,20	33,4
N-NTK (mg N L^{-1})	1300	6900
P_{tot} (mg P L^{-1})	600	6900
$N\text{-}NH_4$ (mg $N\text{-}NH_4$ L^{-1})	700	2500
$P\text{-}PO_4$ (g $P\text{-}PO_4$ 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
Al (g Al kg^{-1} MS)	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	
Coliformes fécaux (UFC par 100 mL)	$1,86 \times 10^7$	

Source: Pinatton (2007).

Les éléments les plus importants retrouvés en quantité non négligeable dans l'alimentation des vaches et donc dans leur déjections; totalement digérés ou non, sont: phosphore (P), azote (N), carbone (C), calcium (Ca), magnésium (Mg), potassium (K) et sodium (Na) (Léonard, 2007). Les bovins laitiers rejettent environ 71% de N, 73% du P et 90% du K contenus dans leur alimentation (Couture et Robert, 2003). L'azote (N) contenu dans le lisier provient essentiellement de l'urine animal, ainsi que des protéines alimentaires (Léonard, 2007; Wright et Mutsvangwa, 2003) et se présente principalement sous deux formes: sels dissous (ammonium)

qui correspondent à la fraction minérale et en protéines qui constituent la fraction organique de N (Barrington et al., 1997). Plus le lisier est sous forme liquide, plus l'azote sera sous forme ammoniacale (Couture et Robert, 2003).

Le P contenu dans le lisier est principalement sous forme solide et inorganique. Une fraction du P est sous forme soluble, principalement des orthophosphates ($H_2PO_4^-$, HPO_4^{2-} et PO_4^{3-}). Le calcium (Ca) constitue 2% du poids de l'animal (Léonard, 2007). Le potassium (K) est en concentration généralement élevée dans le lisier.

L'azote total Kjeldahl (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. L'azote du lisier est principalement sous forme ammoniacale ($N\text{-}NH_4$). Les formes nitrites ($N\text{-}NO_2$) et nitrates ($N\text{-}NO_3$) sont peu ou pas présentes car le milieu est en général anaérobie (Bisaillon et al., 1984). 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, ces formes ne se retrouvent pas dans le lisier stocké avant traitement, puisque dans de telles conditions, le milieu est anaérobie. Les réactions de nitritation et de nitratation sont effectuées notamment par deux espèces microbiennes autotrophes: Nitrosomonas et Nitrobacter (Beline, 2001; Blais, 2006; Gee et al., 1990). De plus, en aérobiose (à la surface du lisier stocké), le $N\text{-}NH_3$ est libéré dans l'atmosphère par volatilisation (Ni, 1999). Une partie du $N\text{-}NH_3$ du lisier est généré par la biomasse au cours de l'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

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

Équation 1.2 Réaction de nitratation

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

Équation 1.3 Réaction globale de nitrification

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

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 (Abella et al., 2006; Blais, 2006; Fruteau et al., 2007).

La concentration en orthophosphates ($H_2PO_4^-$, HPO_4^{2-} ou PO_4^{3-}) du lisier est plus importante que celle du P organique solide (McDowel et Sharpley, 2002). Les phosphates peuvent se retrouver sous forme 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., 2007a).

Plusieurs facteurs influencent la composition du lisier pour un même type d'animal. L'alimentation, le type et la quantité de litière, la durée d'entreposage et la dilution par les précipitations agissent sur la quantité de nutriments présents dans le lisier. Il est donc difficile de fixer des concentrations références concernant les lisiers au Québec, chacun étant particulier. Un

projet d'échantillonnage d'engrais de ferme a été réalisé sur plus de 200 entreprises agricoles de la Mauricie durant les étés 2000 et 2001. Les résultats issus de cette étude, représentatifs à l'échelle de la province (Tessier, 2000) montrent que la composition chimique des engrais de ferme est très variable selon le type de résidus ou d'une entreprise à l'autre. Des écarts importants ont été observés entre la valeur fertilisante des fumiers et lisiers échantillonnés au cours de l'étude (Tableau 1.3).

Tableau 1.3 Teneurs (kg t^{-1}) moyennes, minimales et maximales du contenu en minéraux d'engrais de ferme

	Azote (N)	Phosphore (P_2O_5)	Potassium (K_2O)
Fumier de vaches	1,9 à 9,8	1,2 à 10,9	1,8 à 15,3
Moyenne (99 échantillons)	**5,8**	**3,7**	**5,6**
Lisier de vaches	1,8 à 5,4	0,9 à 2,2	2,4 à 6,2
Moyenne (58 échantillons)	**3,2**	**1,5**	**3,8**

Source: Tessier (2000).

1.1.2 Charge fertilisante des effluents bovins

Le lisier bovin contient des quantités non négligeable de nutriments (N, P, K, Mg, Na, etc.). Avant son application au champ, il est possible de déterminer la concentration de nutriments présente dans un lisier. Il s'agit d'évaluer la charge fertilisante d'un effluent d'élevage bovin. En plus d'éviter de surcharger le champ en nutriments lors de l'épandage, cette évaluation permet de prévoir la quantité de nutriments produite par type d'exploitation. Le Tableau 1.4 présente les valeurs références, concernant la charge fertilisante des effluents d'élevage bovin pour l'année 2003 (CRAAQ, 2003).

Tableau 1.4 Charges fertilisantes d'effluents provenant d'élevages bovins au Québec pour l'année 2003

Catégorie [1]	Durée d'élevage[1] (jr)	Rotation annuelle	Fumier [2]		Analyse fumier (kg t^{-1}) [3]					Rejets par tête produite (kg t^{-1}) [4]			Rejets par 1000 kg de gain (kg t^{-1})		
			Type	Volume (m^3 tête^{-1})	Masse (kg tête^{-1})	MS (%)	N	P_2O_5	K_2O	N	P_2O_5	K_2O	N	P_2O_5	K_2O
Veau de lait	130		2,6	L	1,55	1550	1,50	1,30	1,15	2,52	2,02	1,78	3,91	13	12	26
Veau de grain	185		1,8	S	2,37	1778	29,3	5,40	3,13	4,20	9,60	5,56	7,47	43	25	34
Veau de grain pouponnière	51		6,0	L	0,66	660	1,80	1,30	1,15	1,56	0,86	0,76	1,03	28	24	33
Veau de grain finition	134		2,5	S	2,01	1508	29,3	5,80	3,18	4,34	8,74	4,80	6,54	46	25	34
Veau de grain finition	134		2,5	L	1,6	1610	10,9	5,45	2,98	4,00	8,77	4,80	6,44	46	25	34
Engraissement																
Semi finition	140		2,1	S	2,6	1995	26,9	8,55	3,80	5,95	17,1	7,58	11,9	129	57	90
Finition	160		1,9	S	4,64	3480	26,9	7,42	4,74	5,95	25,8	16,5	20,7	110	70	88
Bovin engraissement	265		1,2	S	6,36	4770	26,9	7,1	4,44	5,95	34,0	21,2	28,4	93	58	98
Semi finition	140		2,1	L	2,8	2800	12,0	6,50	2,71	4,50	18,2	7,59	12,6	138	57	95
Finition	160		1,9	L	5,10	5100	12,0	5,10	3,24	4,06	26,0	16,5	20,7	111	71	88
Bovin engraissement	265		1,2	L	6,90	6900	12,0	5,00	3,07	4,30	34,5	21,2	29,7	94	58	81
Vache et son veau	365			S	15,2	11400	26,2	4,8	2,40	4,92	54,7	27,4	56,1	224	112	230
Génisse (8 – 15 mois)	365			S	7,3	5475	26,2	4,8	2,40	4,92	26,3	13,2	26,9	121	60	124
Taureau (15 mois +)	365			S	10,9	8175	26,2	4,8	2,40	4,92	39,2	19,7	40,2	300	150	307

1. La catégorie d'animaux, la durée d'élevage et les strates de poids ainsi que les gains réalisés représentent la situation généralement rencontrée au Québec.

2. Valeur adaptée du CREAQ (1999) exprimée en kg par tête pour la durée d'élevage, incluant les précipitations. Type L pour liquide et type S pour solide. Dans les élevages de veaux de grain et de lait, la quantité d'eau de lavage utilisée peut influencer significativement le volume de lisier ou de fumier produit.

3. Valeurs tirées des analyses effectuées par Agridirect (2013).

4. Les têtes produites comprennent les têtes vendues et les variations d'inventaire pour la période considérée. (Têtes en inventaire en fin de période – têtes en inventaires en début de période + têtes vendues – têtes achetées).

5. La partie des volumes, masses et charges fertilisantes laissée au pâturage est proportionnelle au nombre de jours passés au pâturage. Les valeurs proposées sont des indicateurs pour établir les charges fertilisantes de l'élevage étudié. Pour plus de précisions, il est recommandé de réaliser le bilan alimentaire, mesurer le volume et la masse de fumier, prélever des échantillons représentatifs des lisiers ou fumiers pour fin d'analyses. La précision de l'évaluation des rejets réels est directement proportionnelle à la qualité des informations obtenues et mesurées.

Source: CRAAQ (2003).

1.1.3 Matière organique

Produite en grande majorité par des êtres vivants (végétaux, animaux, ou microorganismes), la MO est la matière carbonée. Elle se compose de matière vivante (microorganismes, végétaux), de résidus organiques frais, de résidus organiques en décomposition et d'humus (MO stable, stade final de la décomposition). Il s'agit par exemple des glucides, protéines et lipides (Chouinard et Massicotte, 2000; Government of Alberta, 1997). La MO a des effets sur la structure, l'activité biologique, le drainage, la rétention en eau et sur les réserves en éléments nutritifs du sol. Elle est donc un élément constitutif du sol, garant de la productivité et de la rentabilité des cultures. Les effluents d'élevage étant majoritairement utilisés comme engrais, l'apport en MO contenue dans ces derniers a un effet important sur l'évolution et la durabilité d'un sol (Chouinard et Massicotte, 2000; Ndayegamyie et Côté, 1996).

La MO présente dans le lisier provient des aliments non digérés, de la perte directe d'aliments dans la litière, ainsi que des cellules microbiennes (Theobald, 1992). Les lisiers bovins ont une charge organique nettement supérieure à celle des eaux usées domestiques et municipales (Blais, 2006; Chabalier et al., 2006).

La MO contenue dans les purins est très fine et de dimension tellement petite qu'elle peut s'insérer entre les particules de sol et former des agrégats (Foster, 1981). De plus, cette MO soluble est facilement décomposable par les microorganismes du sol qui en font des acides organiques. Ces acides réagissent à leur tour avec le P fixé sur les particules de sol pour le solubiliser et le rendre disponible pour la plante (Meek et al., 1979).

En général, le fumier agira sur la disponibilité du P vers la deuxième année après l'épandage parce que la réaction agit à long terme. Les acides organiques peuvent aussi chélater ou retenir les minéraux en solution dans le sol et prévenir leur lessivage. Par la suite, ils seront décomposés et libéreront des minéraux pour les rendre disponibles à la plante (Barrington et al., 1997).

1.1.4 Microorganismes

Étant un milieu liquide, ne contenant que peu d'oxygène, le lisier est principalement coloniser par des microorganismes anaérobies et anaérobies facultatifs qui produisent des gaz (Don et Donovan, 2002) formant des bulles lorsqu'ils se dégagent à la surface (Steinfeld et al., 2006). Dans le lisier bovin, se retrouvent notamment les genres bactériens suivants: *Streptococcus*, *Bacillus*, *Bacteroides*, *Clostridium*, *Escherichia*, *Eubacterium*, *Proteobacteria* (Steinfeld et al., 2006), *Caldanaerobacter* (Yokoyama et al., 2007) et *Salmonella* (Chachkhiani et al., 2004). Des bactéries telles que *Ruminococcus*, spécifique au système digestif des ruminants, sont aussi omniprésentes dans le lisier bovin (Yokoyama et al., 2007).

1.1.5 Métaux lourds

Les métaux lourds retrouvés dans les zones géographiques consacrées à l'agriculture peuvent être d'origine diverse (retombées atmosphériques, pesticides, etc.). Ayant constaté l'augmentation de la quantité de métaux lourds tels que le cuivre (Cu) et le zinc (Zn), dans les sols d'agro-écosystèmes bénéficiant d'apports intensifs de fumier, plusieurs équipes de recherche se sont penchées sur la présence de métaux lourds dans les lisiers. Les risques possibles relativement aux éléments traces concernent l'épandage répété et à long terme, de matières résiduelles fertilisantes à teneurs élevées en contaminants qui persistent dans l'environnement. Des travaux réalisés par l'IRDA (Giroux et al., 2004) ont d'ailleurs mis en évidence que les

apports répétés d'engrais de ferme sur 10 ans pouvaient amener une augmentation très importante de la fraction extractible (Mehlich 3) du Cu et du Zn, même si la teneur totale du sol n'augmente pas sensiblement (Hébert, 2005). Une étude montre que les concentrations en Zn sont de 10 à 25 fois plus élevées dans le lisier de veau que dans un sol typique (Mantovi et al., 2003). Les concentrations élevées en métaux lourds (Cu et Zn surtout) dans les effluents d'élevage provient d'une pratique très répandue, quasi traditionnelle, qui consiste à ajouter du Zn et du Cu comme compléments alimentaires. Ajoutés à des sels d'argent (Ag), de manganèse (Mn), de molybdène (Mo) ou de sélénium (Se), ces derniers optimisent l'ingestion des aliments, améliorant l'efficacité des aliments et donc la productivité, en plus de provoquer plusieurs effets bénéfiques au niveau pharmacologique (Mantovi et al., 2003).

Concernant l'alimentation de la vache laitière au Québec, les éléments mineurs, comme le Cu, le Zn ou le Mn, sont habituellement apportés à l'animal sous forme de blocs de minéraux (Revy et al., 2003). Le niveau d'absorption de ces minéraux est variable à cause d'une compétition dans le tube digestif, ce qui n'est pas le cas lorsque ceux-ci sont apportés sous une forme organique associés à un ou plusieurs acides aminés et un ou plusieurs éléments mineurs (Fournier et Morneau, 2001). Les compléments alimentaires minéraux (Cu et Zn), sont les principaux métaux retrouvés dans le lisier de vache (Nicholson et al., 1999). Au Québec, des mesures préventives pour limiter les apports, sont en expansion depuis quelques années. C'est le cas des MRF, pour lesquelles de tels règlements préventifs sont déjà en application depuis plusieurs années (MDDEP, 2004). En se basant sur les résultats d'analyses de risque, réalisées principalement aux États-Unis avec les boues municipales, la probabilité d'une contamination significative, au plan environnemental, par les éléments traces des MRF apparaît très faible, même à long terme (Hébert, 2005).

1.1.6 Médicaments

En 1999, les pays de l'Union Européenne ont consommé 4 700 t de médicaments uniquement dédiés à l'usage vétérinaire (1/3 de la consommation annuelle de médicaments) (Martinez-Carballo et al., 2006). Les produits pharmaceutiques (antibiotiques et hormones) sont largement employés dans l'industrie bovine. Ces derniers sont utilisés dans un but préventif, curatif ou dans l'objectif de contrôler et optimiser la croissance des bêtes ou la production du lait (Steinfeld et al., 2006).

Au Canada, les antibiotiques sont utilisés à concentrations thérapeutiques et subthérapeutiques chez les animaux d'élevage. Ces utilisations visent plusieurs objectifs (Association Canadienne des Producteurs de Bovins, 2003):

- Usage thérapeutique - pour le traitement d'infections diagnostiquées;
- Usage prophylactique - pour prévenir les maladies, particulièrement en période de stress (p.ex., lorsque les veaux sont séparés de leur mère et envoyés en parc d'engraissement);
- Stimulant de croissance - pour accroître l'efficacité de l'utilisation des aliments (Association Canadienne des Producteurs de Bovins, 2003).

Les substances hormonales utilisées sont des stéroïdes sexuels naturels (œstrogène, progestérone et testostérone) ainsi que leurs dérivés synthétiques. Ils sont administrés par le biais d'implants insérés dans les oreilles des animaux ou sous forme d'additifs alimentaires. Les substances hormonales sont utilisées en production animale pour favoriser l'utilisation efficace des aliments par l'animal et l'absorption des nutriments. Les substances hormonales offrent les avantages suivants (Association Canadienne des Producteurs de Bovins, 2003):

- Accélération de la production de muscle maigre;
- Amélioration de la qualité de la carcasse par diminution des graisses de dépôt;

- Augmentation de l'efficacité de l'utilisation des aliments (meilleur gain de poids pour moins d'aliments);
- Réduction de coûts pour les producteurs de bovins.

Les quantités importantes de médicaments (hormones et antibiotiques principalement) utilisées en agriculture génèrent des résidus transformés ou non qui se retrouvent dans les lisiers et les fumiers (Schlüsener et al., 2003). L'état des connaissances sur le comportement et la dégradabilité des produits pharmaceutiques issues de la production animale n'est pas très avancé. Il est envisageable que ces derniers s'accumulent et influencent les organismes du sol. Aussi un dérivé hydrophile sera plus mobile et pourra contaminer l'eau souterraine.

Au Québec, compte tenu des effets négatifs sur l'environnement de l'utilisation des pesticides et de l'état des cours d'eau, plusieurs règlements et guides (Guide sur la valorisation des matières résiduelles fertilisantes, MDDEP), encadrent l'utilisation de tous les types de résidus agroalimentaire et municipaux. Organismes et représentant gouvernementaux règlementent et surveillent l'utilisation des médicaments en production animales ainsi que la qualité des sols amendés par les résidus de cette industrie.

1.2 Problématique de la gestion des rejets de lisier

1.2.1 Contamination des eaux

Le problème de la pollution diffuse d'origine agricole liée à l'épandage des surplus de lisiers sur les terres agricoles est de plus en plus préoccupant, surtout dans les zones d'élevages intensifs (Ministère de l'Environnement, 2003). Les sols ainsi que les cultures, surchargés de nutriments, ne peuvent retenir ou assimiler les éléments fertilisants qui deviennent un polluant une fois

libérés en quantités importantes dans le milieu naturel (Lavoie et al., 1994). La méthode d'épandage, ainsi que le choix de la période, ont une incidence sur la gravité de la pollution.

Les fertilisants se retrouvent dans l'environnement par plusieurs processus: ruissellement vers les lacs et rivières; percolation verticale à travers le sol jusqu'à la nappe phréatique; mouvement latéral de la nappe phréatique, déplacement dans les drains agricoles vers les eaux de surface (Ministère de l'Environnement, 2003). Le climat, les propriétés du sol, la géologie du site, les pratiques agricoles et les différentes formes d'utilisation du territoire sont autant de paramètres qui influencent les quantités de polluants transportés (Banton et al., 1994).

1.2.1.1 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. Le P favorise l'eutrophisation des cours d'eau (Ministère de l'Environnement, 2003; Steinfeld et al., 2006). La présence de microorganismes pathogènes dans les lisiers représentent un risque de contamination des eaux de surface (Muirhead et al., 2004). L'apparition de souches résistantes n'est pas non plus à écarter étant donné la présence d'antibiotiques dans les lisiers (Chynoweth et al., 1999; Ministère de l'Environnement, 2003; Steinfeld et al., 2006).

Il a également été montré que les hormones résiduelles présentes dans les déjections se retrouvent dans les cours d'eau et pourraient causer la féminisation ou la masculinisation de poissons et augmenter les cas de cancers du sein ou des testicules chez les mammifères vivant dans l'eau ou consommant cette dernière (Soto et al., 2004).

1.2.1.2 Eaux souterraines

Lors de l'épandage du lisier, les nitrates contenus en concentrations élevées sont lessivés vers des horizons inférieurs et polluent considérablement les eaux souterraines (Lavoie et al., 1994; Ministère de l'Environnement, 2003). Étant chargés négativement comme les particules du sol, les nitrates ne peuvent s'y fixer et sont donc lessivés avec l'eau (Barrington et al., 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).

Au dépit de sa grande affinité avec les particules de sol, le P peut aussi être lessivé vers les eaux souterraines (Lavoie et al., 1994; Steinfeld et al., 2006). Un sol saturé en P ne peut plus en fixer. Tous les apports supplémentaires constituent un risque de lessivage du P vers les horizons inférieurs et, finalement, vers la nappe phréatique. Le P étant sous forme liée est principalement transporté par érosion (Steinfeld et al., 2006).

1.3 Stratégie environnementale de gestion du lisier

1.3.1 Diminution de la charge en éléments fertilisants du lisier

En rationnant les quantités de nutriments dans l'alimentation, il est possible de diminuer la quantité d'éléments fertilisants dans les déjections animales et donc de diminuer l'impact environnemental du lisier (Steinfeld et al., 2006). L'objectif serait alors de synchroniser l'apport en nutriments et les besoins de l'animal. Ainsi, l'emploi d'aliments facilement digestibles est une option (USDA, 2004).

Des nutritionnistes ont proposé de compléter les rations alimentaires avec des enzymes et des vitamines qui permettent d'augmenter la disponibilité du P. Une autre option serait de remplacer une partie des protéines par des acides aminés, mieux assimilables, ou encore, de diminuer la taille des particules alimentaires et d'améliorer leur enrobage. Une autre voie serait de réduire le stress des animaux et d'améliorer la génétique des bovins (FAO, 1999; LPES, 2005). Une gestion rigoureuse de l'alimentation des bovins a permis de réduire les émanations de méthane (sous-produit de digestion des herbivores). Les émissions du bétail auraient ainsi diminué de 11% entre 1990 et 2000 (Ministère de l'Environnement, 2003).

1.3.2 Diminution du volume de lisier produit

L'amélioration des équipements de collecte et de stockage du lisier permet de diminuer le volume final de ce dernier (Steinfeld et al., 2006). L'utilisation de plancher latté, de couverts sur les fosses externes en toutes saisons, d'abreuvoirs et d'économiseurs d'eau permettent de diminuer l'effet de dilution donc le volume final du lisier tout en préservant la ressource eau (LPES, 2005).

1.4 Technologies de traitement existantes

1.4.1 Classement et caractéristiques des technologies existantes

Lorsque les mesures de gestion améliorée du lisier ne permettent pas de rencontrer les critères environnementaux, il est préférable d'implanter une technologie de traitement simple, fiable et facile d'intégration aux installations et opérations en place. Il existe peu de documentations concernant les technologies de traitement du lisier bovin. Le lisier porcin, quant à lui, a fait l'objet de nombreuses recherches ayant permis la mise en place de procédés dont certains très avancés sont actuellement en opération. À ce stade, il est assumé que les technologies fonctionnelles pour le lisier porcin devraient pouvoir s'appliquer au lisier bovin.

Les traitements appliqués au lisier porcin servent à augmenter le taux d'acceptabilité de ce dernier, afin de l'épandre sur de plus grande surface. En dehors de la gestion solide fréquemment rencontrée, la gestion S/L est intéressante. En effet, les éléments fertilisants sont concentrés dans la fraction solide (riche en nutriments), tandis que la fraction liquide est épurée (Bélanger, 2002).

Le traitement du lisier porcin se fait soit à la ferme (à l'échelle de l'entreprise), au sein d'une structure régionale où le traitement est centralisé, ou aux deux endroits (Bélanger, 2002). Un traitement de lisier est dit complet, 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 qualifié de partiel (Bélanger, 2002).

Le lisier peut être modifié par des procédés chimiques, physiques ou biologiques. L'application des procédés de traitement à grande ou moyenne échelle peut varier en fonction du prix des fertilisants sur le marché, de la législation locale, et du coût du procédé (FAO, 1999). Pour être

économiquement et technologiquement viables, de tels procédés nécessitent de très grandes quantités de lisier et peuvent donc difficilement être implantés sur les exploitations. En plus de s'intégrer facilement aux modes opératoires en cours, les procédés de traitement du lisier se doivent d'être simples et viables (Day et Funk, 1998).

En règle générale, les procédés de traitement du lisier découlent de technologies mises au point pour le traitement des eaux usées. Ils sont classés selon le mode opératoire, à savoir: physiques, biologiques, physico-chimiques ou thermiques (Day et Funk, 1998).

1.4.2 Procédés physiques

1.4.2.1 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 (tables drainantes) n'exercent aucune pression (Bélanger, 2002).

1.4.2.2 Séparation membranaire

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

Les membranes de microfiltration et ultrafiltration représentent un moyen très efficace pour assurer la séparation S/L du lisier. Ces techniques permettent de retenir les particules qui contiennent les nutriments tels que le P. Étant donné que ces deux procédés permettent la rétention de molécules et de particules d'assez grosse taille, elles ne développent pas une pression osmotique optimale et requiert des pressions réduites lors des opérations. Les études menées sur l'ultrafiltration et la microfiltration (Tableau 1.6) de lisiers sont généralement axées sur l'enlèvement des MES, des colloïdes et des bactéries contenus dans des mélanges d'effluents issus de pré-traitements (réacteurs biologiques) (Massé et al., 2007b).

Tableau 1.5 Résumé des traitements expérimentaux d'ultrafiltration et de microfiltration appliqués au lisier

Références	Type d'effluent	Caractéristiques de la membrane	Pressions et flux
Fugère et al. (2005)	4 types de lisier de porc • Surnageant d'un réservoir de stockage (2% ST) • Pré-filtré (600 µm, ST NR) • Tamisé (500 µm) et décanté (1,2% ST) • Tamisé (500 µm), traité biologiquement et décanté (0,3% ST)	Fluorure de polyvinylidène (PVDF) 0,01 µm	100 kPa 10-40 L $m^{-2} h^{-1}$
Lee et al. (2001)	Liqueur mixte pré-filtrée (63 µm) (ST NR) Réacteur anaérobie acidogène (20°C) alimenté aux eaux usées de porcherie (0,2% MES)	Ester de cellulose (0,5 µm)	NA 10-40 L $m^{-2} h^{-1}$
Pieters et al. (1999)	Lisier de porc à 0,8% ST décanté et filtré (100 µm)	Céramique (0,1 µm)	180 kPa 159 L $m^{-2} h^{-1}$
Shin et al. (2005)	Liqueur mixte (0,8 -1,8% MVES) provenant d'un réacteur à nitrification (aérobie, 25°C) alimenté avec des effluents de porcherie (0,1% MES)	ND 0,25 µm	Succion > 55 Hg 10-30 L $m^{-2} h^{-1}$
Viau et Normandin (1990)	Effluent (0,4% ST) d'un réacteur aérobie alimenté en lisier de porc	ND 0,2 µm	140-275 kPa 114 L $m^{-2} h^{-1}$
Zhang et al. (2004)	Liqueur mixte (1,6 - 5% MES) d'un réacteur anaérobie (37°C) alimenté en lisier porcin	Polyéthersulfone 20 kDa	20-70 kPa 5-10 L $m^{-2} h^{-1}$
Zitomer et al. (2005)	Liqueur mixte (ST NR) d'un réacteur anaérobie alimenté au lisier de vache (4,4% VS)	Titane 0,2 µm	NA 40-80 L $m^{-2} h^{-1}$

ND: Données non disponibles, NR: Non reporté, MES: Matières en suspension, MVES: Matières volatiles en suspension.

Source: Massé et al. (2007b).

Plusieurs procédés de traitement de lisier utilisant les systèmes membranaires sont exploités sous la forme de bioréacteur à membrane (BRM). Il s'agit de combiner un bioréacteur à biomasse suspendue avec une séparation par membranes de microfiltration ou d'ultrafiltration (Figure 1.1). Dans un tel système, le procédé conventionnel de boues activées est modifié de façon à remplacer les décanteurs par une filtration membranaire (Comeau et al., 2006).

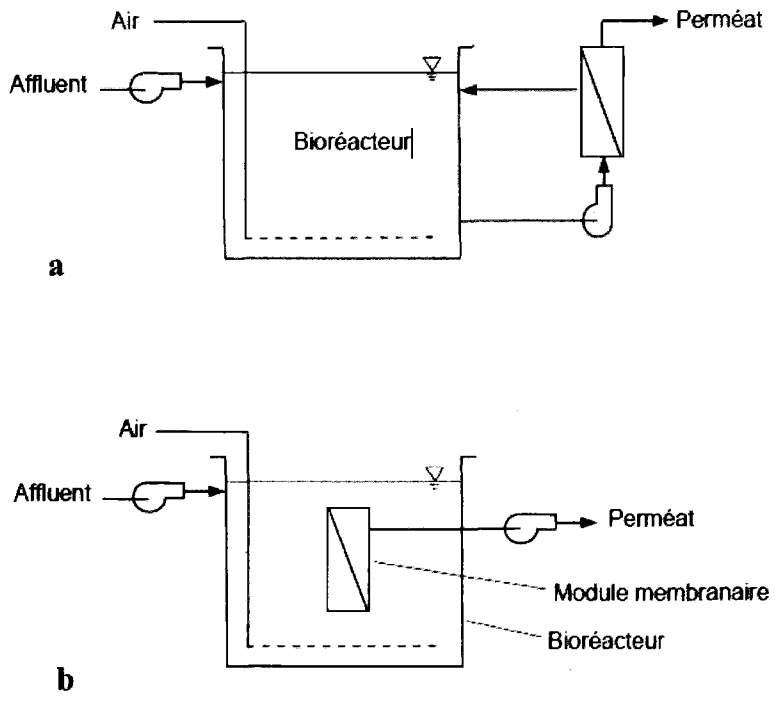

Figure 1.1 **Schémas de bioréacteurs à membranes: a) bioréacteur à membranes en boucle externe, et b) bioréacteur à membranes immergées (Comeau et al., 2006)**

Selon certaines études, un BRM alimenté par l'effluent décanté du bioréacteur à boues activées, a permis d'enlever 77% de la DBO_5, plus de 96% des MES, 82% du NTK, 99% du $N\text{-}NH_4$, 38% du P_{tot} et 100% des coliformes fécaux. Ainsi, un BRM pourrait remplir les fonctions d'enlèvement de la DBO_5 et de nitrification et assurer ainsi une performance supérieure d'enlèvement des MES et des coliformes fécaux (Comeau et al., 2006).

Un système pilote composé d'une membrane a été installé dans une ferme canadienne par la compagnie Purin Pur. Le système utilise une grille pour éliminer les particules grossières, l'ultrafiltration en mode tubulaire pour la rétention des MES et du P particulaire. Le traitement se termine par un passage en osmose inverse en mode tubulaire. Bien que les données techniques ne

soient pas encore accessibles au grand public, les promoteurs assurent que même s'il rencontre des problèmes de colmatage, le système produit une eau presque pure pouvant être rejetée sans incidence dans les cours d'eau (Massé et al., 2007b). Ces types de système font l'objet de plusieurs projets de recherche. Surtout comme étape de polissage, les systèmes membranaires permettent d'obtenir une eau propre sans utilisation de produits chimiques dommageables pour l'environnement.

1.4.3 Procédés biologiques

1.4.3.1 Traitement aérobie

Ce type de traitement nécessite le développement d'une flore microbienne aérobie permettant l'oxydation de la MO du lisier et la diminution de la DBO et de la demande chimique en oxygène (DCO). Ces deux indicateurs fournissent de l'information sur la quantité d'oxygène nécessaire pour dégrader la MO présente dans l'eau. De façon globale, 50% du carbone est converti en biomasse récupérée par sédimentation. Le P en solution est également diminué par absorption biologique, mais à un niveau moindre. La MO 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 traitement aérobie existent, comme les boues activées, les lits bactériens, les fossés d'oxydation, les lagunes ou étangs aérés (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 anaérobiose (LPES, 2005).

1.4.3.2 Traitement anaérobie

La digestion anaérobie permet, en milieu dépourvu d'oxygène libre, la dégradation et la stabilisation de la MO, la réduction de la DCO et de la DBO (Steinfeld et al., 2006), la production de biogaz (un mélange de dioxyde de carbone et de méthane) et d'une biomasse microbienne (Kelleher et al., 2000). Pour cette raison, cette technologie est déjà répandue pour la production de biogaz dans les exploitations bovines, notamment en Europe. Par contre, aucun enlèvement de N et de P 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'AGV (acide acétique, propionique, butyrique) (d'où le terme acidogénèse), d'hydrogène et de dioxyde de carbone. Ces AGV sont ensuite transformés en gaz sous forme de méthane (70%) et de dioxyde de carbone (30%), au cours de la méthanogenèse (Blais, 2006; Chynoweth et al., 1999). Il est fréquent que la dégradation du lisier de vache commence pendant le stockage (Chachkhiani et al., 2004). Les procédés mésophiles (30-40°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 thermophiles (50-60°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 thermophile et de plus, ils permettent de réduire les risques sanitaires lors de l'utilisation du lisier traité (Ahring et al., 2001; Vindis et al., 2009).

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. Des recherches sur le traitement du lisier de porc sont en cours pour la mise au point de procédés psychrophiles (5-20°C).

1.4.3.3 Compostage

Très utilisé sur les exploitations bovines en gestion solide, le compostage est une technologie aérobie naturelle. Dans un premier temps, le compost est dégradé par une microflore bactérienne complexe produisant des résidus qui, après maturation, se transforment en compost (Bélanger, 2002; Day et Funk, 1998). Ce procédé de traitement peut être appliqué à du lisier, mais dans ce cas, contrairement au fumier solide, il est nécessaire d'ajouter un substrat riche en fibres et en carbone afin, notamment, d'en diminuer l'humidité et pour ajuster le rapport C/N (Barrington et al., 1997). Certaines situations imposent l'ajout d'enzymes et d'inoculum de microorganismes pour améliorer la dégradation du lisier en compost. Le compost ressemble à de l'humus. Il est composé de minéraux et de MO stabilisée. Durant le traitement, se déroule une production de dioxyde de carbone et d'eau (Day et Funk, 1998; Steinfeld, 2006). La hausse de température pendant la phase de maturation permet également de dégrader les graines et autres germes présents dans le lisier, ainsi que les microorganismes potentiellement pathogènes.

Le vermicompostage utilise des vers en plus des microorganismes pour dégrader la MO. L'espèce de lombrics la plus couramment utilisée est *Eisenia foetida* (Garg et al., 2006). Les vers morcèlent les grosses particules de lisier lors de leur processus d'alimentation ce qui stabilise et augmente la quantité de MO disponible pour la dégradation microbienne. Le taux de décomposition est considérablement accéléré. Le lisier ainsi transformé en humus riche en nutriments est appelé vermicompost (Garg et al., 2006; LPES, 2005).

1.4.4 Procédés physico-chimiques

1.4.4.1 Acidification, oxydation et chaulage

De tels traitements entraînent une altération 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). La chaux permet également d'augmenter la valeur agronomique du lisier, car elle augmente la capacité d'échange cationique et abaisse l'acidité des sols sur lesquels le lisier sera apporté (LPES, 2005).

1.4.4.2 Oligolyse

Ce traitement consiste à appliquer un courant électrique au lisier à travers un ensemble d'électrodes. Des ions métalliques (fer, aluminium) sont mis en solution par le passage du courant électrique. Les ions en solution se combinent à d'autres ions de charges opposées (ions sulfures) formant des précipités qui sont éliminés par décantation, généralement sous forme de boue. Ce procédé permet de réduire l'émission de sulfure d'hydrogène, dont les ions sulfures constituent un précurseur. Le sulfure d'hydrogène est le gaz le plus odorant produit par le lisier (Government of Alberta, 1997). Cette technique est donc principalement employée pour la réduction des odeurs.

1.4.4.3 Coagulation/floculation

Ce procédé de traitement fait appel à deux principes: un traitement chimique par ajout de coagulants et de floculants et un traitement physique de séparation en deux phases par gravité (Bélanger, 2002). Le coagulant agit au niveau de la charge des particules colloïdales, soit en les

neutralisant, soit en leur fixant une charge positive ou négative. Les particules ainsi déstabilisées ne subissent plus l'effet des forces répulsives qui les tiennent naturellement à distance et s'agglomèrent. L'ajout de floculants favorise la formation de flocs en agglutinant les particules colloïdales chargées ou non (Bélanger, 2002). Les amas de particules agglomérées en flocs et décantées sont séparés du lisier. Il est important de s'assurer lors de la sédimentation, que la vitesse d'écoulement horizontale du lisier ne nuise pas à la décantation des solides les moins denses (LPES, 2005).

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 chitosan) ou, plus souvent, synthétiques (polyélectrolytes non ioniques, anioniques, ou cationiques) (Bolto et Gregory, 2007).

1.4.5 Procédés thermiques

Le lisier est séché afin d'évaporer la phase liquide. Le solide obtenu est riche en fertilisants. Il peut alors être conditionné sous différentes formes (cubes, granules) (Bélanger, 2002). Ce procédé est surtout employé pour éviter des coûts de chauffage importants lors de la gestion solide du lisier.

1.4.6 Technologies de traitement commercialisables

Le Tableau 1.7 présente des technologies de traitement commercialisables, répertoriées par la FPPQ en 2005 dans le cadre du Plan agroenvironnemental de la production porcine. Ce plan date de 2005, mais les technologies plus récentes sont également présentées par la FPPQ (2005). 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. Une règlementation plus stricte, qui imposerait le traitement du lisier aux producteurs bovins, pousserait fort probablement tous les acteurs de ce secteur prospère de l'agriculture à adapter de telles technologies pour le traitement et la valorisation des résidus du lisier bovin.

Tableau 1.6 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: Opération: Totaux[a]:	10-15 $\$\cdot m^{-3}$ 5-10 $\$\cdot m^{-3}$ 15-20 $\$\cdot m^{-3}$
Manurex (Purin Pur) 11/2001	Mécanique: séparation mécanique et filtration	Non disponible	Complet (sur la fraction liquide)	Immobilisation: Opération: Totaux[c]:	10-15 $\$\cdot m^{-3}$ < 5 $\$\cdot m^{-3}$ 10-15 $\$\cdot m^{-3}$
Technologie Carbofil 05/2005	Biologique: digestion aérobie	Non disponible	Partiel	Immobilisation: Opération: Totaux[c]:	10-15 $\$\cdot m^{-3}$ < 5 $\$\cdot m^{-3}$ 10-15 $\$\cdot m^{-3}$
Bio-Terre Systems Inc. 04/2004	Biologique: digestion anaérobie	Non disponible	Partiel (production de biogaz)	Immobilisation: Opération: Totaux[c]:	10-15 $\$\cdot m^{-3}$ < 5 $\$\cdot m^{-3}$ 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: Opération: Totaux[c]:	< 5 $\$\cdot m^{-3}$ < 5 $\$\cdot m^{-3}$ 5-10 $\$\cdot m^{-3}$
Procédé Maximiser 08/2004	Mécanique: séparation mécanique	Non disponible	Partiel	Immobilisation: Opération: Totaux[c]:	< 5 $\$\cdot m^{-3}$ < 5 $\$\cdot m^{-3}$ 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	Biologique: biofiltration	Non disponible	Complet (sur la fraction liquide)	Immobilisation: Opération: Totaux[c]:	5-10 $\$\cdot m^{-3}$ 5-10 $\$\cdot m^{-3}$ 10-15 $\$\cdot m^{-3}$
Lisox	Mécanique: floculation, flottation	Ferme	Partiel	Immobilisation: Opération: Totaux[c]:	< 5 $\$\cdot m^{-3}$ < 5 $\$\cdot m^{-3}$ 5-10 $\$\cdot m^{-3}$

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 en traitant 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}.

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.

Source: FFPQ (2005).

1.5 Traitement du lisier bovin par coagulation/floculation

1.5.1 Définitions et mécanismes

Grâce à une déstabilisation des charges à la surface des particules colloïdales, la coagulation permet l'agrégation de ces dernières. Une fois les particules coagulées, l'ajout de floculant assure leur agrégation. Le volume de flocs ainsi formé est augmenté, facilitant l'extraction des solides à partir du lisier (Degrémont, 1989). Coagulation et floculation sont des processus souvent indissociables. En effet, la coagulation en diminuant les forces de répulsion entre les particules, favorise les collisions et la formation d'agrégats; et la floculation, en permettant la croissance des agrégats, accélère la séparation des phases solide et liquide (Figure 1.2).

À l'origine, les particules colloïdales sont considérées comme stables dans le lisier. En effet, elles sont réparties dans le liquide et maintenues à distance par des forces répulsives. Deux forces régissent cette 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. Les colloïdes étant de petite taille, l'effet des forces de répulsion à plus d'effet sur elles que les forces d'attraction. Elles sont donc éloignées les unes des autres (Bolto et Gregory, 2007; Degrémont, 1989).

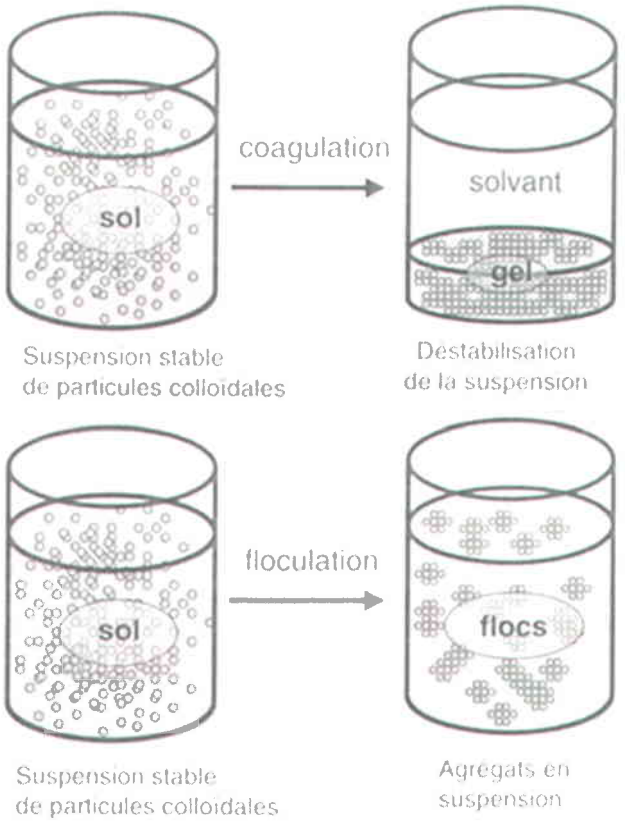

Figure 1.2 Principes de la séparation du lisier par coagulation/floculation (Mottot, 2000)

Sur leur surface, les colloïdes portent des charges négatives (Figure 1.3). Ces dernières attirent les ions positifs en solution. Les ions positifs sont étroitement collés au colloïde et forment la couche liée ou couche de STERN, qui, à son tour, attire des anions accompagnés d'une faible quantité de cations: cet ajout forme une autre couche appelée la couche diffuse ou couche de GOUY. Il y a donc formation d'une double couche ionique, l'une accompagnant la particule lors de son déplacement, l'autre se déplaçant indépendamment ou avec un certain retard.

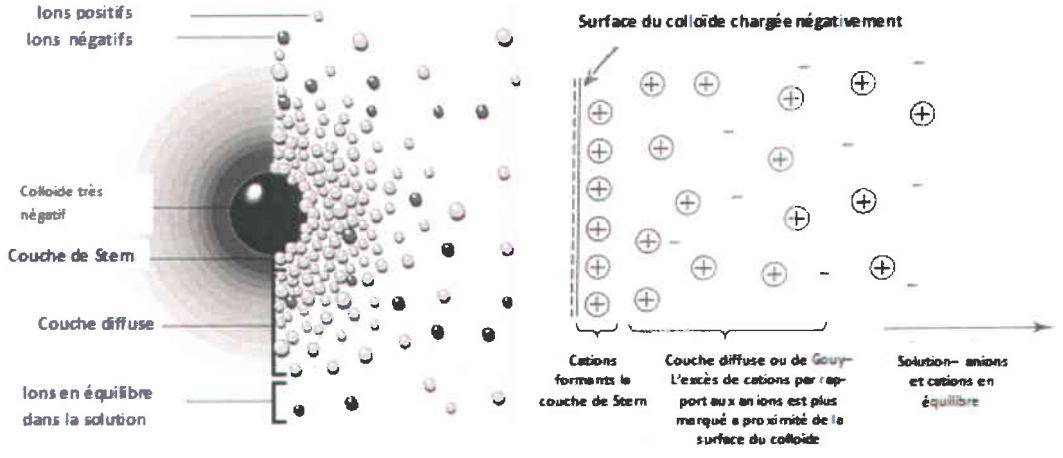

Figure 1.1 Formation de la double couche à la surface d'une particule colloïdale

Il existe entre ces deux couches un potentiel électrostatique appelé aussi potentiel de NERNST, qui varie en fonction de la distance par rapport à la surface du colloïde. Dans la couche liée, le potentiel de NERNST décroît de manière linéaire car les cations qui constituent cette couche sont empilés uniformément. La couche de GOUY, présente un potentiel électrostatique qui varie de manière non linéaire. Dans cette couche, la répartition ionique est aléatoire à cause de l'empilement non uniforme de cations et d'anions.

La valeur du potentiel à la surface de la couche de NERNST est appelé potentiel zêta. Les colloïdes étant chargés négativement, ce potentiel est négatif. Les particules de potentiel zêta négatif se repoussent très fortement. Pour cette raison, les colloïdes sont très stables et inhibent naturellement toute agglomération en solution (BEI et ERE, 2003; Drogui et al., 2005).

1.5.2 Phénomène de coagulation

Ainsi, pour parvenir à l'agglomération des colloïdes et à leur enlèvement de la solution, il faut annuler le potentiel zêta ce qui aura pour effet d'annuler les forces de répulsion (Figure 1.4).

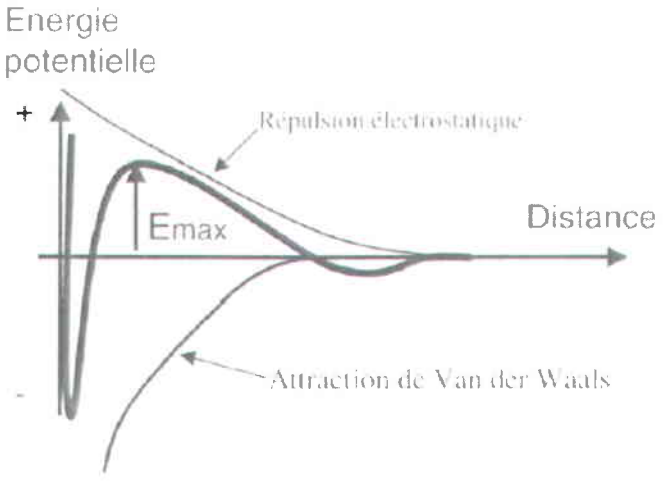

Figure 1.2 Théorie de DLVO de l'attraction et répulsion entre deux particules (Mottot, 2000)

Entre deux particules colloïdales, il existe des forces de répulsion électrostatiques, et des forces d'attraction intermoléculaires (Van der Walls). L'énergie potentielle de ces particules varie donc en fonction de la distance les séparant. Un enchaînement de réactions justifie la déstabilisation des charges à la surface des particules. Les ions positifs issus du coagulant se lient aux charges négatives qui enrobent les particules colloïdales. Il s'en suit une déstabilisation des charges à la surface de particules neutralisées. Les forces répulsives ne faisant plus effet, les particules se rapprochent les unes des autres et se fixent par des liaisons entre les ions et autres espèces à la

surface des particules. Les amas de colloïdes formés se retrouvent incorporés dans des précipités d'hydroxydes (Bolto et Gregory, 2007; Degrémont, 1989).

Pour annuler le potentiel zêta, il y a plusieurs possibilités:

- Ajuster le pH pour atteindre le point de charge nulle des particules colloïdales;
- Augmenter la salinité pour comprimer la couche diffuse;
- Neutraliser la charge de surface par des cations polyvalents;
- Piéger les colloïdes dans des précipités;
- Adsorber les colloïdes sur des polymères chargés à longue chaîne.

1.5.3 Phénomène de floculation

La floculation est une agglomération progressive des particules; d'abord en micro-flocs, puis en flocs de plus en plus volumineux. Le taux d'agglomération des particules dépend de la probabilité des contacts et de l'efficacité de ces derniers. La floculation a justement pour but d'augmenter la probabilité de rencontre entre les particules grâce à l'agitation du fluide. Les flocs finissent par atteindre une densité suffisante pour permettre leur décantation (Degrémont, 1989). Les collisions entre les particules sont favorisées par des gradients de vitesse dans le liquide d'où la nécessité de l'agiter. Cependant, une trop forte agitation peut entrainer un bris des flocs et en diminuer le volume. Il convient de trouver la bonne technique d'agitation afin d'optimiser la floculation et la décantation.

Le phénomène de floculation est décrit par la théorie de SMOLUCHOWSKI dont les hypothèses sont les suivantes:

- Régime permanent;
- Mélange parfait;
- Pas d'attrition, ni de fragmentation;

- Chaque collision conduit à une agrégation.

Donnant l'équation suivante:

Équation 1.5 $$\frac{dN}{dt} = -\frac{2}{3}Gd_p^3N^2$$

Avec:

N: Nombre de particules par unité de volume (m^{-3});

G: Gradient de vitesse (s^{-1});

d_p: Diamètre de particule (m).

1.5.4 Nature et particularités des polymères synthétiques

Les polyacrylamides (Figure 1.5) 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 est une des caractéristiques déterminante lors de l'utilisation des polymères. Il 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).

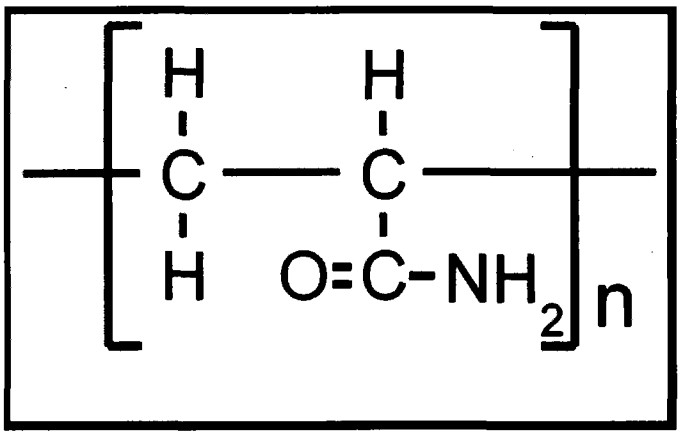

Figure 1.3 Structure chimique d'une molécule d'acrylamide

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) (Bolto et Gregory, 2007; Degrémont, 1989). Depuis leurs découverte, la recherche concernant l'utilisation des polymères comme floculant/coagulant ne cessent d'ouvrir une multitude de champs d'action et de méthode de traitement que ce soit pour la production d'eau potable, la décontamination d'eaux usées ou dans la recherche biomédicale de pointe. Le Tableau 1.7 présente quelques domaines d'application des floculants synthétiques en fonction de leur charge et de leurs poids moléculaire (Mottot, 2000).

Tableau 1.7 Domaines d'application de floculant en fonction de leur charge et de leur PM

Domaines d'application	Non ionique	Anionique			Cationique		
		Faible	Moyen	Fort	Faible	Moyen	Fort
Floculation argiles et schistes en milieu neutre			X				
Décantation des argiles				X			
Floculation silice					X		
Floculation en milieu acide	X	X					
Floculation en milieu salin	X	X					
Décantation en milieu basique				X			
Floculation de suspensions organiques coagulées par un produit minéral	X	X	X				
Décantation de boues activées						X	X
Conditionnement de boues Organiques					X	X	X
Conditionnement de boues Urbaines						X	X
Filtration de boues minérales			X	X			

Source: Mottot (2000).

Plusieurs travaux réalisés sur le lisier porcin (Bélanger, 2002; Meunier et al., 2009), ainsi que d'autres travaux portant sur le lisier bovin (Garcia et al., 2007; Pinatton, 2007), préconisent d'utiliser des polymères synthétiques (PAM) fortement cationiques ayant un poids moléculaire (PM) moyen à élevé pour la floculation des particules contenues dans les lisiers. Ces polymères seraient mieux adaptés au captage des MES dans les résidus liquides chargés, tels que les boues d'épuration municipales ou les effluents de l'industrie agroalimentaire.

Les travaux comparatifs réalisés par Vanotti et al. (1996) sur les eaux résiduelles issues de l'élevage porcin démontrent que l'utilisation de polymères cationique d'acrylamide permet un enlèvement optimal des MES et des nutriments comparativement aux PAM anioniques ou

neutres. Selon ces mêmes travaux, les polymères ayant une densité moyenne à élevée sont plus efficaces que ceux ayant une densité faible et très élevée (Vanotti et Hunt, 1999). Le polymère cationique Zetag 7654 a notamment donné de bons résultats antérieurement sur le lisier de vache-génisse (Pinatton, 2007). En effet, une floculation permettant la séparation solide liquide est obtenue lorsque des fractions de lisier bovin diluées à une concentration de 1,3 à 1,5% ST sont mélangées au polymère Zetag 7654 (concentration de la solution de 1 g L^{-1}) dans une proportion de 13% du volume de la solution de polymère par rapport au volume de lisier. Une concentration de 1 g polymère L^{-1} était optimale comme solution de polymère additionnée aux lisiers (Pinatton, 2007).

1.5.5 Polymères organiques naturels

Les floculants organiques naturels sont des polymères hydrosolubles d'origine animale ou végétale. Généralement non ioniques, ils peuvent être modifiés chimiquement pour un traitement plus spécifique. Compte tenu de leur faible poids moléculaire, ils sont moins efficaces que les polymères synthétiques.

L'aspect les plus attractifs des polymères organique et/ou naturels réside dans leur caractère naturel, non toxique et biodégradable. Cette caractéristique permettrait une large utilisation de ces derniers dans une vaste gamme de procédés. Les rejets issus de ces derniers ne représenteraient pas de risque pour l'environnement étant donné la non toxicité du polymère. Les plus utilisés sont les amidons, les alginates et les gommes guar ou xanthane. Plusieurs projets de recherche réalisés avec de l'amidon modifié comme coagulant sur des liquides résiduels ont démontré une certaine efficacité de ces derniers. En effet, l'utilisation d'amidon hautement cationique préparé en laboratoire pour le traitement d'eaux blanches issues de papeteries a été testée sous différentes conditions. Avec une concentration de 200 mg L^{-1}, sans ajustement de pH

et un temps de contact de 24 h, 85,5% de la DCO et 83,3% des MES ont été retirées du liquide résiduels suite à une floculation suivie d'une étape de tamisage (Xing et al., 2005). Ces produits sont cependant réservés à des applications très spécifiques car ils sont chers, parfois rares comparativement à la taille du marché de traitement des eaux (cas des gommes guar par exemple), et ont une efficacité réduite en raison de leur faible longueur de chaîne. Le chitosan, (polymère de β (1-4) -linked 2- acetamido-2-deoxy-D-glucopyranose) est probablement un des polymères organique les plus accessibles (Figure 1.5). Bien que coûteux en comparaison des PAM, ce dernier est présent dans la nature en quantités phénoménales et renouvelables (Hong et Meyers, 1989). Issu de la chitine, qui est la protéine du monde marin par excellence, le chitosan est considéré comme l'équivalent de la cellulose en termes de possibilité au niveau des applications et de quantités disponibles. Ce dernier peut être constitué à partir de l'extraction des polysaccharides présents dans les carapaces de crustacées et autres structures marines (Kurita, 2006). Une étude récente réalisée avec du lisier de vache laitière à différentes concentrations (0,4% à 3,2% ST) sur lequel plusieurs concentrations de chitosan ont été testés, a démontré que ce polymère présente de bonnes capacités de traitement. Avant floculation le lisier a été passé sur une série de deux tamis (1 mm puis 0,25 mm). Après floculation, le mélange coagulé a été tamisé à 1 mm. Le traitement a permis de retenir 95% des MES, 73% du NTK et 54% du P_{tot} (Garcia et al., 2008). Le chitosan se présente de plus en plus comme le polymère naturel de choix pour les résidus issus de l'élevage du bétail. En plus de sa grande disponibilité, il présente des résultats nettement supérieurs aux autres polymères naturels qui ne sont pas aussi efficace que ce dernier sur les résidus organiques à forte charge (Renault et al., 2009).

1.6 Traitement du lisier bovin par électrocoagulation

L'électrocoagulation est un procédé électrochimique à anodes solubles qui, sous l'action du courant électrique, libèrent des ions métalliques (Fe^{2+}, Fe^{3+}, Al^{3+}) (Équation 1.6) susceptibles de produire un coagulant en solution et de provoquer une coagulation floculation des polluants que l'on souhaite éliminer (Bennajah, 2007). L'électrolyse peut également coaguler les composés solubles oxydables ou réductibles contenus dans l'effluent (Drogui et al., 2007; Feng et al., 2003). Ces derniers se combinent avec les ions hydroxydes produits à la cathode (Équation 1.7), générant ainsi la formation d'hydroxydes métalliques favorables à la formation de flocs. Tel que décrit précédemment, les ions métalliques agissent comme coagulants (Asselin et al., 2008; Damien et al., 1992; Drogui et al., 2007).

Équation 1.6 Libération des ions métalliques

$$Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2\ e^-$$

$$Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+} + e^-$$

Équation 1.7 Production de microbulles d'oxygène et d'hydrogène

(+) anode: $2\ H_20 + 4\ e^- \rightarrow 0_2 + 4\ H^+$

(-) cathode: $2\ H_20 + 2\ e^- \rightarrow H_2 + 2\ OH^-$

L'électrocoagulation permet deux types de configuration. Dans la configuration dite monopolaire (MP), les électrodes sont individuellement connectées au générateur de courant de telle sorte qu'une anode est immédiatement suivie d'une cathode (Figure 1.6) (Drogui et al., 2005). Dans la

configuration bipolaire (BP), seules les deux électrodes placées aux extrémités de la cellule sont physiquement connectées au générateur de courant (Damien et al., 1992). Les six électrodes intermédiaires, non connectées, fonctionnent alors comme des dipôles, ayant chacune deux faces actives, une positive et une négative (Figure 1.7).

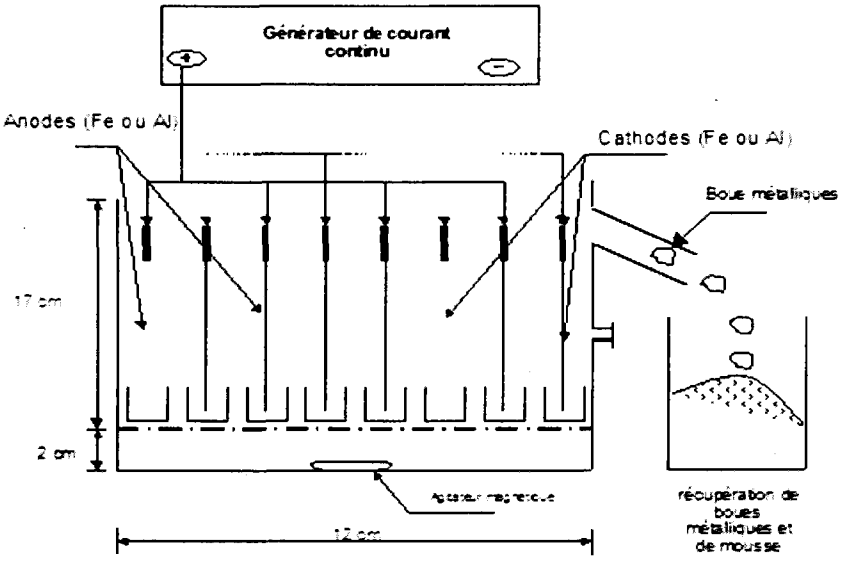

Figure 1.4 **Cellule d'électrocoagulation à électrodes monopolaires (MP) (Drogui et al., 2005)**

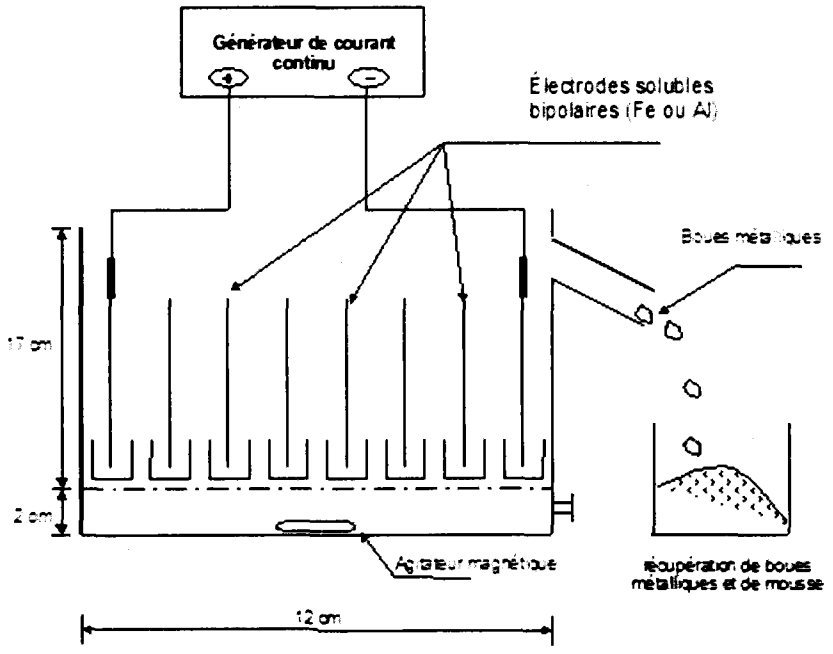

Figure 1.5 **Cellule d'électrocoagulation à électrodes bipolaires (BP) (Drogui et al., 2005)**

Peu de publications mentionnent l'utilisation de l'électrocoagulation comme procédé de séparation S/L du lisier. La fraction liquide issue d'un procédé de traitement biologique de lisier porcin a subi des essais d'électrocoagulation avec des électrodes de fer et d'aluminium. Grâce à cette technique et à la coagulation des composés organiques réfractaires au traitement préalable, des enlèvements de 65% de la DCO et de 87% de la DBO ont été observés à partir de la fraction liquide. Le principal avantage de cette technologie est le faible coût (0,2 à 0,3 \$ m^{-3}) (Laridi et al., 2005). D'autres essais d'électrocoagulation sur des fractions de lisier porcin diluées ont permis un enlèvement de 98% du P_{tot} et 20-50% de N_{tot} à partir d'une fraction liquide de lisier porcin (Drogui et al., 2005). Par analogie, il peut être supposé que le processus d'électrocoagulation fonctionne sur les particules colloïdales dans le lisier bovin, puisque ces dernières présentent les mêmes caractéristiques de surface. De plus en plus populaire auprès de

l'industrie agroalimentaire pour le traitement des résidus liquides et de l'industrie textile pour l'enlèvement des colorants des eaux usées, l'électrocoagulation est un procédé simple et efficace à moindres coûts (Drogui et al., 2007). Il est donc pertinent dans le cadre de cette recherche d'évaluer les potentialités de cette technologie sur les procédés de séparation S/L du lisier bovin.

Plusieurs projets de recherche ont démontré l'efficacité de cette technique de traitement qui peut s'adapter au traitement de plusieurs types de résidus liquides (Holt et al., 2004). Les effluents provenant d'un abattoir de volailles ont été traités par électrocoagulation utilisant des anodes en acier doux ou en aluminium. Les résultats ont montré que la meilleure performance a été obtenue à l'aide du système d'électrodes en acier doux en mode BP. En imposant un courant de 0,3 A pendant 60 ou 90 min de traitement, il a été possible de retenir 86 ± 1% de la DBO ainsi que 99 ± 1% des corps gras (huiles et graisses). La DCO soluble et la DCO totale ont été abaissées de 50 ± 4% et 82 ± 2%, respectivement. Le traitement est également efficace pour la décoloration et la clarification de l'effluent; 89 ± 4% des MES et 90 ± 4% de la turbidité ont été éliminés de l'effluent d'abattoir (Asselin et al., 2008). La coagulation électrochimique a fait l'objet de recherches dans plusieurs domaines. Le traitement d'effluents issus de cales de bateaux permet dans certaines conditions (0,3 A, 60 min, mode BP) d'éliminer plus de 70% de la DCO (Drogui et al., 2009).

Ce type de technologie s'est aussi montré efficace lors d'essais sur le traitement d'effluents urbains (Damien et al., 1992; Holt et al., 2004).

1.7 Valorisation des sous-produits de traitement du lisier

1.7.1 Devenir des différentes fractions après traitement

Les sous-produits issus des traitements appliqués aux lisiers sont potentiellement valorisables. Dans le cadre de cette recherche qui favorise une séparation S/L, deux fractions résiduelles seront produites: une fraction solide et une fraction liquide.

La fraction solide, concentrée en nutriments et en MO, peut être utilisée directement comme engrais organo-minéral dans les zones qui ne sont pas considérées en surplus de nutriments (N et P surtout). Si la siccité recherchée est atteinte, les coûts et manipulations reliés au transport du lisier seront amoindris, facilitant ainsi son transport vers des zones moins sensibles. La fraction solide peut également être acheminée dans un centre de traitement centralisé. En y ajoutant des matières carbonées (copeaux de bois), il est possible par compostage de la fraction solide d'obtenir un compost de très bonne qualité (Blais et al., 2007).

La fraction liquide peut être valorisée directement à la ferme ou chez des producteurs receveurs. En comparaison avec le lisier brut, elle présente des concentrations en nutriments amoindries par le traitement et pourrait donc être entièrement valorisée. La fraction liquide issue du traitement constituerait ainsi une eau fertilisante allégée en P adaptée aux besoins des cultures, en évitant de dépasser les limites de capacité du sol. La fraction liquide peut aussi être recyclée et utilisée comme eau de lavage ou stockée en fosse pour une utilisation ultérieure. Cet effluent devrait être nettement moins odorant que le lisier brut et pourrait donc être épandu en utilisant des équipements conventionnels d'épandage (Blais et al., 2007).

1.7.2 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 Règlement sur les exploitations agricoles (REA). Bien que l'un des objectifs du présent projet est de remplacer les polymères synthétiques par des polymères organiques naturels, il est important de mentionner que les résidus de traitement utilisant des polymères ne sont pas considérés comme des résidus d'élevage, mais bien comme des MRF (MEF, 1998) Les MRF doivent respecter certaines normes du Guide sur la valorisation des matières résiduelles fertilisantes (MDDEP, 2004) afin de pouvoir être épandues. Chaque MRF est classée selon la teneur en contaminants chimiques (catégories C), en pathogènes (catégories P) et selon les caractéristiques d'odeurs (catégories O). D'où le nom de la qualification 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. 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 spécifiques de mitigation (MDDEP, 2004). Même si un lisier contenant des polymères est classé MRF, les agriculteurs n'ont pas d'autre moyens que l'épandage pour l'éliminer à moindre coût. Le cadre qui régit l'épandage d'un tel lisier reste donc le REA car les résidus issus des traitements appliqués ne rencontrent pas toujours les critères du Guide de valorisation qui est plus stricte.

L'usage des polymères est très répandu dans le traitement des eaux usées mais peu d'études ont été menées pour déterminer leurs impacts sur l'environnement et la santé humaine (Liber et al., 2005; Mercier et al., 2005). Il semble toutefois qu'ils ne présentent pas de risques importants pour la santé, étant donné leur nature organique et biodégradable (Mercier et al., 2005; Smith et

al., 1996). Lorsque les taux d'application sont dans les normes, les PAM n'ont pas d'effet négatif sur la croissance des plantes (Seybold, 1994). L'usage de polymères anioniques sans danger pour la santé est fréquent dans l'alimentation animale et les cosmétiques (Mercier et al., 2005). Les polymères cationiques sont plus toxiques que les polymères anioniques (Bolto et Gregory, 2007; Liber et al., 2005); il n'est donc pas recommandé de les utiliser pour stabiliser un sol. En effet, ils pourraient à très forte dose provoquer une toxicité chez 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 d'acide humique dans le sol. Les PAM s'y lient fortement (Goodrich et al., 1991). Les PAM ont donc un potentiel toxique réel pour les organes vitaux des êtres vivants dans le milieu s'ils ne sont pas adsorbés sur les solides. Cependant, les PAM épandus dans les champs se fixent rapidement et de façon irréversible aux particules du sol (Mercier et al., 2005; Seybold, 1994). 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 polymères utilisés pour le traitement d'effluents très chargés en MO comme le lisier se lient de façon très forte avec les solides et il ne sont pratiquement plus disponible dans le milieu liquide (Mercier et al., 2005). Une fois fixées, les molécules de polymères se dégradent avec le temps. Lorsque l'utilisation des polymères se fait de façon adéquate lors du conditionnement des biosolides il n'existe pas de risques démontrés pour l'environnement et pour l'homme (Mercier et al., 2005; Smith et al., 1996).

1.8 Critères d'évaluation des technologies

1.8.1 Enlèvement des MES et des ST de la fraction liquide

Les technologies de traitement du lisier sont généralement évaluées selon des critères environnementaux, agronomiques, techniques, économiques, sociaux et de santé. Le Tableau 1.8 présente les critères d'évaluation des technologies émergentes dans le cadre du Plan agroenvironnemental de la production porcine du Québec. Dans le contexte actuel de ce projet, l'aspect économique a été particulièrement évalué.

Tableau 1.8 Critères d'évaluation des technologies émergentes pour le lisier porcin

Environnementaux	Agronomiques	Techniques	Économiques	Sociaux/santé
Réduction des émissions de gaz à effet de serre	Contenu et valeur en MO du produit	Adaptabilité au climat québécois	Réduction des volumes à gérer	Réduction des nuisances olfactives aux bâtiments et à l'entreposage
Réduction des émissions d'ammoniac	Valeur fertilisante (qualité et quantité) des sous-produits	Adaptabilité à la gestion actuelle à la ferme	Sensibilité aux coûts de main d'œuvre	Réduction des nuisances olfactives à l'épandage
Augmentation du taux de demande des sous-produits	Réduction de la compaction des sols	Amélioration des conditions de manutention des produits	Sensibilité aux coûts des intrants	Acceptabilité de la production
Réduction du transfert des polluants à l'environnement (globalement)	Prolongement de la période d'apport possible sur les cultures	Disponibilité des équipements et infrastructures requis	Potentiel d'accroissement de la charge animale	Santé et bien-être du travailleur agricole
Réduction des impacts négatifs associés à la consistance du produit	Élargissement de l'éventail des cultures réceptrices	Besoins en intrants (biomasse ou autres)	Adaptabilité à la taille de l'entreprise	Santé et bien-être de la population (risques chimiques et biologiques)
Réduction des impacts négatifs associés au volume à gérer (énergie)	Amélioration des performances zootechniques	Disponibilité des intrants (niveau provincial)	Sensibilité à la distance de transport du produit	Santé et bien-être des animaux (risques chimiques et biologiques)
Diminution des risques d'accidents d'opération et de déversements	Réduction de la toxicité des produits	Besoins en support technique et en formation (autonomie de gestion)	Marché potentiel pour les sous-produits	
Amélioration du contrôle de la dose et de l'uniformité des sous-produits à épandre	Élargissement de l'éventail des utilisations non conventionnelles	Disponibilité du support technique	Coût de formation et de support technique	
Besoins d'ajout de substances nocives		Besoins d'entretien	Durée de vie utile	
Besoins en biomasse et en énergie non renouvelable		Complexité		
Diversification des périodes possibles d'apport sur les cultures		Adaptabilité à la variation de la charge à traiter		
		Adaptabilité à la croissance de l'entreprise		

Source: Plan agroenvironnemental de la production Porcine du Québec (2002)

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

1.8.2 Siccité de la fraction solide

La siccité de la fraction solide est associée à la concentration des ST dans la fraction solide du lisier. Un pourcentage de ST supérieur à 11% 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.

1.8.3 Teneur en P_{tot} des fractions solide et liquide

L'évaluation de la teneur globale en P_{tot} permet de déterminer la quantité de P dans le lisier de départ et la proportion de P retenu dans les différentes fractions, après chacune des étapes de traitement. Aucune valeur cible n'a été fixée pour l'instant concernant ces données. L'objectif étant surtout de connaître les concentrations en P dans chacune des fractions au cours du procédé. Pour la première partie du projet, il a été estimé qu'une proportion de 75% du P d'origine dans les fractions solides était une cible prometteuse.

1.8.4 Teneur en N-NTK et en $N\text{-}NH_4$ des fractions liquide et solide

Il est important de déterminer la teneur totale en azote non-oxydé (N-NTK) dans la fraction liquide. Comme le P, l'azote se retrouve aussi souvent en excès dans l'environnement causant quelques dommages. Il est donc important de connaître les teneurs en N dans les fractions liquides, aussi bien que solides, puisque les doses appliquées de lisier et de matières résiduelles

fertilisantes sur les sols agricoles sont calculées en fonction de l'apport en N disponible, lequel est établi à partir des teneurs en N ammoniacal et organique.

1.8 Hypothèses et objectifs

Afin d'en arriver au développement d'une filière de traitement de lisier bovin peu dispendieuse et efficace, il est proposé d'utiliser des séquences de tamisage, de coagulation (ou électrocoagulation) et de décantation pour concentrer plus de 80% des solides et du P_{tot} dans une fraction solide ayant plus de 11% de ST. Le procédé devrait être simple, nécessiter peu de produits chimiques et de main d'œuvre, et être applicable directement sur le lisier de la pré-fosse. Ce procédé devrait concentrer les MES et le P_{tot} dans une fraction solide, compostable et/ou transportable sur des terres pauvres en nutriments. Le liquide issu de ce(s) traitement(s), peu chargé en P et MES pourrait être utilisé comme eau d'irrigation à la ferme sans risque de surcharge en P. Plus spécifiquement, cette recherche vise à rencontrer les objectifs suivants:

- Détermination des conditions optimales de tamisage pour le pré-traitement du lisier bovin;
- Optimisation des conditions de floculation du lisier de bovin à l'aide de polymères synthétiques;
- Étude du remplacement des polymères synthétiques par des polymères naturels biodégradables;
- Optimisation des conditions opératoires de l'électrocoagulation pour la séparation S/L du lisier bovin;
- Sélection de la filière la plus performante pour le traitement du lisier bovin et démonstration de celles-ci à l'échelle du pilote de laboratoire. Le coût d'exploitation du procédé doit être inférieur ou égal à 15 \$ m^{-3} de lisier traité. La concentration du liquide doit être inférieure ou égale à 3 g MES L^{-1}.
- Réalisation d'une étude technico économique complète concernant la filière utilisant le Zetag comme polymère pour la séparation S/L du lisier de bovin.

CHAPITRE 2 MATÉRIELS ET MÉTHODES

2.1 Échantillonnage du lisier

Le lisier de vache laitière-génisse a été échantillonné à la ferme de M.G. L'Heureux située dans la municipalité de Saint-Henri-de-Lévis (Québec, Canada). 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 pailles de céréales hachées (Figure 2.1). La quantité de pailles employée est 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 laitières, tandis que trois grosses fosses reçoivent du lisier mélangé (vache-génisse).

Le lisier de vache génisse a été prélevé au centre de la pré-fosse après un brassage de 20 à 30 min. Le brassage de la fosse a été effectué lors du pompage du contenu de celle-ci vers la fosse externe. L'activation des pompes (actionnées par un tracteur) assurait un bon mélange du lisier (Figure 2.2). Après échantillonnage, le lisier a été stocké dans une chambre froide à 4°C. Au cours des périodes d'essais, l'échantillonnage se déroulait toutes les deux semaines.

Figure 2.1 **Photographies des installations de la ferme M.G. L'Heureux**

Figure 2.2 **Photographies des racleuses, pompes et fosses au site d'échantillonnage**

2.2 Séparation du lisier par pré-tamisage

Afin de débarrasser le lisier des particules grossières qui nuisent aux étapes de traitement subséquentes, une étape de conditionnement appelée pré-tamisage a été effectuée. Plusieurs séquences de tamis ont été évaluées dans le but de déterminer la séquence la mieux adaptée à cette étape. Des volumes de 1 L de lisier brut ont été versés sur plusieurs séquences de tamis de marque W.S Tyler USA Standard Testing Sieve. Le maillage ainsi que le nombre de tamis utilisés pour chaque séquence sont présentés au Tableau 2.1. Chaque séquence a été testée en triplicata.

Tableau 2.1 Conditions expérimentales pour la détermination de la séquence optimale de tamis destinée à l'étape de pré-tamisage (maillage en mm)

	Séquence 1	Séquence 2	Séquence 3	Séquence 4 (pilote)
Tamis 1	3,18	3,18	3,18	5,0
Tamis 2		1,0	0,5	2,0
Tamis 3				0,5
Tamis 4				
Nombre d'essais (*n*)	3	3	3	3

Le montage illustré à la Figure 2.3 et complété par un réceptacle pour le liquide tamisé, a été posé sur un agitateur à secousse de marque Endecott, modèle Test Sieve Shaker 1MKII. Un temps d'agitation de 15 min a été utilisé lors de tous les essais.

Figure 2.3 **Photographies des équipements de tamisage au laboratoire**

Suite aux tests précédents, d'autres essais complémentaires ont été poursuivis à l'échelle pilote. Afin d'observer l'étape de pré-tamisage à l'échelle pré-industrielle, des volumes de 40 L de lisiers bruts ont été séparés sur un tamis à secousse de marque Sweco (modèle LS18 vibro-energy separator) (Figure 2.4). Le montage est identique à celui exploré au laboratoire. Les tamis étaient superposés et agités par vibration. Le liquide résiduel était récupéré au bas du montage. La séquence de tamis au pilote a été testée en triplicata (Tableau 2.1).

Les masses humides (MH) des particules retenues sur chaque tamis ont été relevées. Les concentrations en ST ont été mesurées dans les fractions solides et liquides. Afin de comparer la qualité du liquide pré-tamisé, le lisier brut ainsi que le liquide issu de l'étape de pré-tamisage ont été analysés en duplicata afin de déterminer les concentrations en P_{tot} et N-NTK. L'objectif du

procédé étant principalement l'enlèvement du P_{tot}, ces résultats permettaient d'approximer le rendement de cette étape de traitement.

Figure 2.4 Photographies des équipements de tamisage au pilote pré-industriel

2.3 Floculation du lisier pré-tamisé à l'aide de polymères

2.3.1 Sélection du polymère

La compagnie Ciba Specialty Chemicals produit une série de polymères cationiques sous l'appellation Zetag (ACAT, 2006). Plusieurs polymères de cette série ont été testés en fonction de leurs caractéristiques. Ces derniers présentent un poids moléculaire (PM) variant de moyen à ultra-élevé (Tableau 2.2).

Tableau 2.2 Caractéristiques des polymères cationiques testés

Produit	Formule	Charge	PM	Intervalle de pH	Principales applications
Zetag7557	Granules fins	+	Moyen	4-9	BP, FP,C, Th
Zetag7587	Granules fins	++	Moyen	4-10	BP, FP, C
Zetag7689	Poudre	+++	Élevé	4-10	C, PC, Th, FI
Zetag7654	Poudre	+++++	Élevé	4-10	C, BP, Th, FI, FP
Zetag8180	Granules fins	+++++	Ultra-élevé	4-10	C, BP, Th, FI, FP
Zetag8185	Granules fins	+++++	Ultra-élevé	4-10	C, BP, Th, FI, FP
Zetag8190	Granules fins	+++++	Ultra-élevé	4-10	FP, Th, BP

PC = Primary clarification on bead: solid grade bead; C = Centrifuge powder: solid grade powder; BP = Belt Press LDP. Liquid dispersion; FP = Filter Press solution: solution grade liquid; FI = Flotation, Th = Thickening by filtration.

Source: Adapté de ACAT (2006).

Des volumes de 320 mL de lisier pré-tamisé (3,18 et 0,5 mm) et dilué à 2% ST ont été mélangés à 80 mL (20% v/v) de solution de Zetag (1 g L^{-1}). Après une agitation de 2 à 4 min avec un barreau aimanté, les mélanges ont été tamisés à 0,5 mm. Les liquides résiduels (volume, ST, MES) et les résidus solides floculés (MH, ST) ont été analysés afin de comparer l'efficacité des polymères testés. Les tests ont été réalisés en duplicata.

2.3.2 Détermination de la concentration optimale de polymère

Le polymère a été préparé par ajout de 1 g de Zetag 7654 en poudre à 1 L d'eau distillée. Le tout a été agité pendant 2 à 4 h à l'aide d'un barreau magnétique. La solution de polymère a ensuite été ajoutée au lisier.

Les concentrations de polymère testées sont exprimées en termes de % (v/v) du volume total à traiter (solution de polymère + lisier pré-tamisé dilué). Trois concentrations de polymère ont été testées, soit des proportions de 15, 20 et 25% (v/v) de la solution de polymère Zetag 7654 à

1 g L^{-1}. Les tests ont été réalisés en triplicata sur des volumes de 500 mL (lisier + polymère) pré-tamisés (3,18 et 0,5 mm) et présentant une concentration de 2% ST.

Après un temps de contact de 2 à 4 min (polymère + lisier) par un mélange dynamique à l'aide d'un barreau aimanté, le tout a été tamisé à 0,5 mm. La concentration en ST et la masse sèche des solides retenus sur les tamis après floculation ont été évaluées sur les fractions solides. Les concentrations en MES et en ST ont aussi été évaluées sur les fractions liquides.

2.3.3 Détermination de la concentration optimale de ST

Le lisier obtenu après le pré-tamisage (3,18 et 0,5 mm) a été dilué pour obtenir une gamme de quatre concentrations en ST, soit 1,3, 1,5, 1,8 et 2,0% ST. La concentration de polymère utilisée pour cette série de tests était de 20% (v/v) de la solution de polymère Zetag 7654 à 1 g L^{-1}. Les tests ont été réalisés en triplicata sur des volumes de 500 mL (lisier + polymère) pré-tamisés (3,18 et 0,5 mm). Après un temps de contact de 2 à 4 min (polymère + lisier) suite à un mélange dynamique à l'aide d'un barreau aimanté, le tout a été tamisé à 0,5 mm. La concentration en ST et la masse sèche des solides retenus sur les tamis après floculation ont été évaluées sur les fractions solides. Les concentrations en MES et en ST ont aussi été évaluées sur les fractions liquides. Les tests ont été réalisés en triplicata.

2.3.4 Essais de floculation avec des polymères organiques naturels

En tenant compte des recherches bibliographiques effectuées, de leur disponibilité et des recommandations des fournisseurs, quatre polymères organiques naturels (PON) ont été retenus pour les tests. Il s'agit de deux polymères à base d'alginate: Protanal L 20 et Protanal XL RB fournis par la compagnie FMC Biopolymer, un polymère à base d'amidon modifié: NSIGHT C1 (Alco Chemical) et un polymère à base de chitine: le chitosan fourni par la compagnie Sigma

Aldrich. Le Tableau 2.3 présente les principales informations techniques concernant les PON testés. La comparaison de l'efficacité des PON a été effectuée par la même procédure que celle utilisée pour comparer les PAM.

Tableau 2.2 Principales caractéristiques des PON testés

Produit	Formule	Charge	PM	Intervalle de pH	Principales applications
Protanal L20	Poudre fine	Cationique	Élevé	6-8	W.T; I.S
Protanal XL RB	Poudre fine	Cationique	Élevé	6-8	W.T; I.S
NSIGHT C1	Poudre fine	Cationique	Ultra-élevé		
Chitosan	Poudre	Cationique	Élevé	6-8	W.T

W.T: Water treatment; I.S: Industrial Sundry.

En fonction des concentrations optimales recommandées et des objectifs de traitement, les polymères préalablement dilués ont été ajoutés à des volumes de 425 mL de lisier pré-tamisé (3,18 et 0,5 mm) et dilué à 2% ST. Les solutions de polymère ont été préparées à une concentration de 2 g L^{-1}. Une concentration de solution de polymère de 15% (v/v) par rapport au volume de lisier tamisé dilué a été appliquée pour cette série d'essais. Après une agitation avec un barreau aimanté pendant 2 à 4 min, les mélanges (425 mL lisier tamisé dilué + 75 mL polymère à 2 g L^{-1}) ont été tamisés à 0,5 mm. La formation de flocs, les liquides résiduels et les résidus solides floculés ont été observés afin de comparer l'efficacité des polymères testés. L'efficacité de la floculation a été notée de 0 à 3. Une cote de 0 à 1 a été attribuée pour chacun des trois paramètres susmentionnés, l'addition de ces trois cotes permet d'obtenir une note comparative attribuée en fonction du niveau de floculation atteint.

2.3.5 Évaluation du chitosan comme floculant du lisier bovin

Une forme de chitosan fournie par la compagnie Sigma-Aldrich (Tableau 2.3) de PM élevé a été évaluée. La dissolution du chitosan en milieu aqueux nécessite l'emploi d'acide. Dans la

présente recherche une solution d'acide acétique a donc été utilisée pour la dissolution initiale du chitosan. La série de tests réalisés visait l'évaluation simultanée de l'effet de deux paramètres sur l'efficacité de l'enlèvement des MES, soit la concentration en chitosan et celle de l'acide acétique. L'objectif étant encore une fois d'abaisser le coût du procédé, il convient d'établir la concentration minimale de polymère et de diluant nécessaire pour un traitement jugé efficace.

Les essais ont été réalisés avec 1 L de lisier brut, ce dernier a été pré-tamisé (3,18 et 0,5 mm) puis dilué à 2,0% ST. Une proportion de 10% (v/v) d'une solution de chitosan a été ajoutée au lisier pré-tamisé dilué. Après un temps de contact de 2 à 4 min (polymère + lisier) suite à un mélange dynamique à l'aide d'un barreau aimanté, le tout a été tamisé à 0,5 mm. Des solutions de chitosan préparées à 2, 5, 8 et 10 g L^{-1} ont été ajoutées au lisier. L'acide acétique dans les solutions de chitosan a été ajusté à différentes concentrations comprises entre 0 et 1,0% (v/v). Les fractions solides et liquides de chacune des étapes du traitement ont été analysées pour déterminer les teneurs en ST, MES, MH, P_{tot} et N-NTK.

2.4 Validation de la filière utilisant les polymères

2.4.1 Étude de reproductibilité de la filière au laboratoire

Le but de cette série de test était d'évaluer la stabilité du procédé de séparation S/L du lisier bovin utilisant le polymère Zetag 7654 comme agent floculant. Le procédé a été effectué trois fois successivement à partir du même lisier et dans des conditions parfaitement identiques. Les paramètres opérationnels sont ceux qui ont été retenus comme optimaux pour le développement de la filière utilisant le Zetag.

Les essais ont été réalisés avec des masses humides de 1 000 g de lisier pré-tamisé (3,18 et 0,5 mm). Après l'étape de pré-tamisage en séquence (3,18 mm et 0,5 mm), le liquide résiduel a

été dilué de moitié et la solution de polymère (1 g Zetag 7654 L^{-1}) a été ajoutée dans une proportion de 20% (v/v) du volume de traitement final (solution de polymère + lisier tamisé dilué). Les fractions solides et liquides de chacune des étapes du traitement ont été analysées pour ST, MES, MH, P_{tot}, N-NTK et $N\text{-}NH_4$.

2.4.2 Essais en mode continu de la filière au laboratoire

L'objectif de ces essais était d'observer l'évolution des fractions résiduelles de la filière dans un mode de fonctionnement continu, au cours duquel l'eau en fin de procédé serait recirculée afin de minimiser la consommation d'eau « neuve ».

Au cours des essais, le liquide résiduel de l'essai précédent a donc servi comme eau de dilution pour abaisser la teneur en particules du lisier tamisé dilué de l'étape suivante. Six boucles ont ainsi été effectuées. Une boucle est un essai qui utilise le liquide résiduel de l'essai précédent comme eau de dilution. Après l'étape de pré-tamisage en séquence (3,18 mm et 0,5 mm), le liquide résiduel a été dilué de moitié et la solution de polymère (1 g Zetag 7654 L^{-1}) a été ajoutée dans une proportion de 20% (v/v) du volume de traitement final (solution de polymère + lisier tamisé dilué). Les fractions solides et liquides de chacune des étapes du traitement ont été analysées pour ST, MES, MH, P_{tot}, N-NTK et $N\text{-}NH_4$.

Le lisier tamisé utilisé pour réaliser les six boucles de traitement a été produit en une seule et même étape de pré-tamisage.

2.4.3 Étude de la filière à l'échelle pilote

2.4.3.1 Étude de reproductibilité de la filière

Les essais pilotes reproduisent les conditions expérimentales fixées lors des tests précédents à la différence que les volumes utilisés sont beaucoup plus importants. Le but étant d'approximer les

performances du procédé s'il fonctionnait en mode industriel ou installé à la ferme. Le volume de dilution du liquide issu de l'étape de pré-tamisage ne sera pas appliqué en fonction de l'évaluation des ST. Afin de faciliter les manipulations à la ferme, ce dernier sera simplement et systématiquement dilué de moitié.

Figure 2.5 **Photographies des équipements de tamisage à l'échelle pilote utilisant le Zetag 7654**

Un volume de 40 L de lisier a été tamisé sur une séquence de trois tamis ayant un maillage de 5, 2 et 0,5 mm de marque Sweco. Le tout a été agité par un vibrateur à secousse de marque Sweco (modèle LS18 vibro-energy separator) (Figure 2.5). Compte tenu du fait que le volume de lisier

maximal pouvant être traité est de 10 à 12 L par passage, le volume de 40 L a été tamisé par trois passages de 10 à 15 min.

Des volumes de 4 L de lisier tamisé issu de l'étape de pré-tamisage ont été dilués de moitié (par l'ajout de 4 L d'eau du robinet) puis mis en contact avec le polymère de référence (20% (v/v) de solution de Zetag 7654 à 1 g L^{-1}). Après un contact stimulé par agitation mécanique à l'aide d'une hélice pendant 10 à 15 min, le mélange a été séparé sur un tamis tangentiel construit et fourni par la compagnie Lisox et ayant un maillage de 0,5 mm (Figures 2.5 et 2.6). Les fractions solides et liquides de chacune des étapes de traitement ont été analysées pour ST, MES, MH, P_{tot} et N-NTK.

Trois essais identiques ont été menés avec le même substrat de départ (liquide tamisé et dilué). Ce triplicata a permis d'observer et d'évaluer le comportement de la filière utilisant le polymère Zetag 7654 comme agent floculant à l'échelle du pilote pré-industriel.

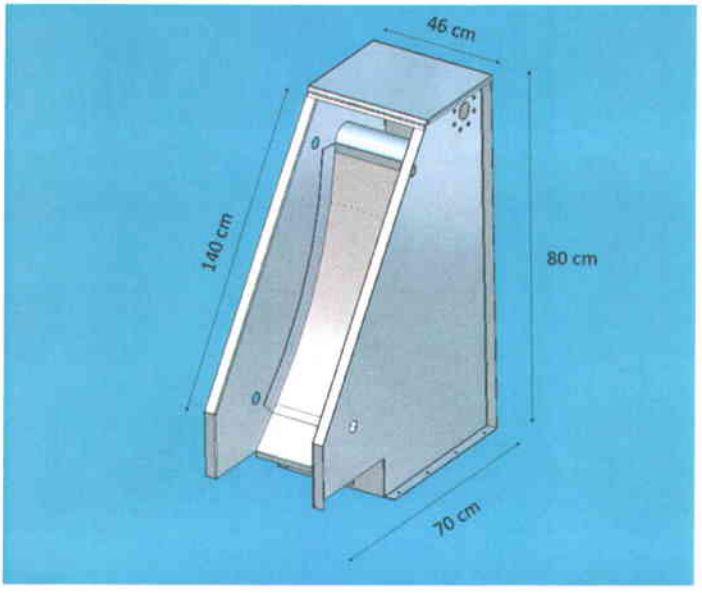

Figure 2.6 **Schéma du tamis tangentiel utilisé lors des essais pilotes (Lisox)**

2.4.3.2 Essais en mode continu de la filière à l'échelle pilote

Les essais en boucle ont été menés selon la même méthodologie que celle développée précédemment au laboratoire (section 2.4.2). Ayant constaté des valeurs de MES élevées concernant les fractions liquides finales des essais réalisés au pilote, une étape de traitement a été ajoutée. Le liquide final issu de la filtration avec le tamis tangentiel a été mélangé à 10% (v/v) d'une solution de PAM à 1 g L^{-1} par une agitation mécanique de 5 à 10 min, puis passé au travers d'un tamis de marque W.S Tyler USA Standard Testing Sieve, de 250 µm de maillage. Le liquide issu de ce dernier traitement a été utilisé comme eau de dilution pour le lisier pré-tamisé en début de procédé. Quatre boucles ont ainsi été effectuées.

2.4.3.3 Égouttage et séchage des fractions solides résiduelles

Deux types de résidus solides sont générés au cours du procédé. Le premier type est constitué de pailles, de grains et autres résidus issus de l'étape de pré-tamisage. Ces premiers résidus ont été étalés sur un support incliné à l'air libre (extérieur) (Figure 2.7).

Figure 2.7 **Photographies des fractions solides résiduelles lors des essais d'égouttage**

Le deuxième type est composé des résidus solides coagulés, issus de l'étape de floculation à l'aide du polymère (Figure 2.7). Ces résidus ont été placés sur des grilles dans un système fermé afin d'évaluer la perte d'eau. Pour assurer le suivi de la perte de liquide à partir des solides résiduels, la concentration en ST a été évaluée une fois par jour pendant trois jours pour quatre fractions différentes issues du procédé. Un échantillon composite a été effectué pour chaque fraction, constitué de plusieurs petites portions de résidus prélevés à même le tas et ce, après avoir bien mélangé ce dernier.

2.5 Séparation du lisier par électrocoagulation

2.5.1 Détermination du mode optimal de configuration

Les essais d'électrocoagulation ont été effectués dans une cellule électrolytique en acrylique de forme parallélépipédique mesurant 12 cm de large, 12 cm de longueur avec une profondeur de 19 cm. Celle-ci peut recevoir un volume de liquide de 1,7 L (Figure 2.8). Ce montage comprend huit électrodes parallèles planes et rectangulaires en acier doux avec une distance inter-électrode de 1 cm.

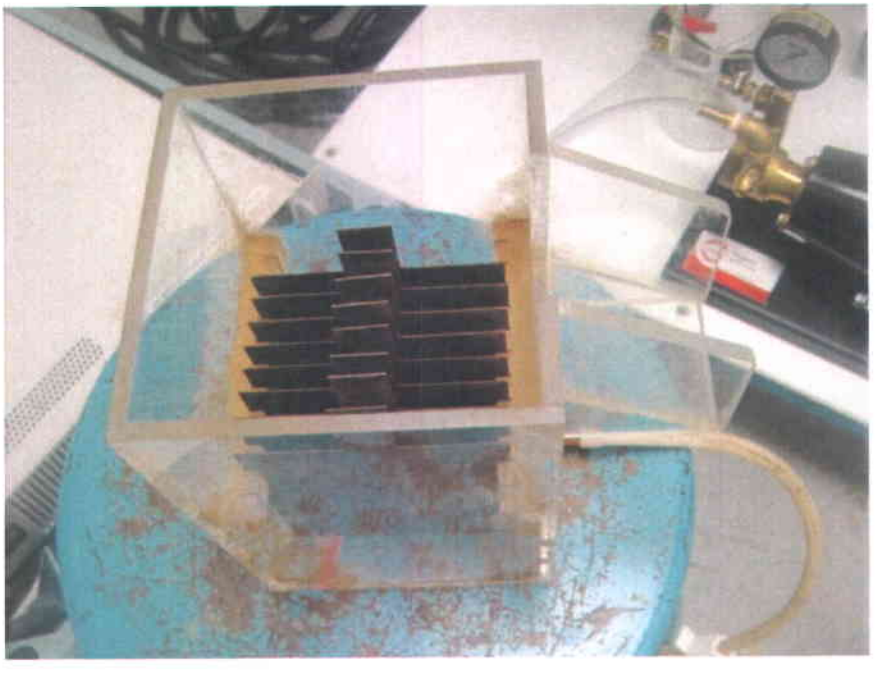

Figure 2.8 **Cellule d'électrocoagulation avec électrodes de fer**

Afin de déterminer la configuration qui favorise le mieux la coagulation du lisier, plusieurs intensités ont été appliquées dans les deux modes de fonctionnement, soit monopolaire (MP) et bipolaire (BP) (Figure 2.9). Pour chaque essai, un volume de 1,7 L de lisier ayant une concentration de 4,5% ST a été traité pendant 60 min. Des intensités de courant de 0,5, 1,0 et 1,5 A ont été testées en mode BP, alors que des intensités de 1,0, 2,0 et 3,0 A ont été utilisées en mode MP. Les essais ont été réalisés en duplicata. La mesure du volume décanté après 2 h de décantation dans des cônes est un des critères d'évaluation des essais. Plus l'électrocoagulation est performante, plus il y a formation de flocs. Le surnageant représente la fraction liquide, tandis que la portion décantée est considérée comme la fraction solide. Après décantation, un prélèvement a été réalisé dans les cônes, sur chaque fraction, afin d'évaluer la concentration en ST et en MES (fraction liquide). Du lisier n'ayant subi aucun traitement a été décanté parallèlement aux essais de coagulation pour servir de contrôle.

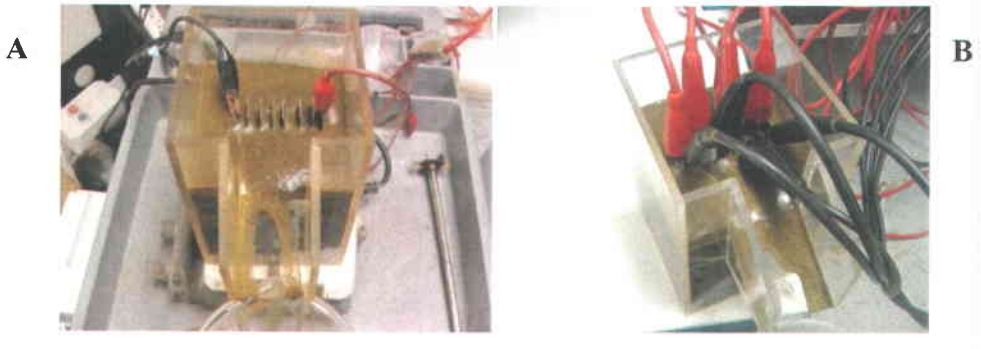

Figure 2.9 **Montage d'électrocoagulation avec électrodes de fer utilisé pour le traitement du lisier bovin à l'échelle laboratoire. A: Configuration bipolaire (BP). B: Configuration monopolaire (MP)**

2.5.2 Optimisation de la concentration en ST

Le lisier tamisé a été dilué pour obtenir différentes teneurs en ST (1,6, 1,9, 3,0 et 3,9% ST). Chacune des concentrations précédentes ont été évaluées lors de l'électrocoagulation du lisier. Ces essais d'électrocoagulation ont été menés avec des électrodes de fer, connectées en mode MP et à une intensité de 3 A. Les essais ont été réalisés en duplicata. Un temps de réaction ($t_{élec}$) de 60 min a été utilisé lors de ces essais, alors qu'un temps de décantation ($t_{déc}$) de 120 min a été retenu. Des essais contrôles constitués de lisier non-traité mais décanté pendant 120 min ont également été réalisés pour des fins de comparaison.

2.5.3 Optimisation de l'intensité du courant électrique

Différentes intensités de courant (1, 2, 3, 4 et 6 A) ont été testées pour le traitement du lisier par électrocoagulation. La teneur en ST du lisier a été fixée à 1,7% ST. Ces essais d'électrocoagulation ont été menés avec des électrodes de fer, connectées en mode MP et à une intensité de 3 A. Les essais ont été réalisés en duplicata. Un temps de réaction ($t_{élec}$) de 60 min a été utilisé lors de ces essais, alors qu'un temps de décantation ($t_{déc}$) de 120 min a été retenu.

2.5.4 Optimisation de la durée de l'électrocoagulation

Différents temps d'imposition du courant électrique (15, 30, 45 et 60 min) ont été testés pour le traitement du lisier tamisé dilué. La teneur en ST du lisier a été fixée à 1,5% ST et l'intensité de courant à 3 A. Les essais ont été réalisés en duplicata.

Afin de réduire la dépense attribuable à la consommation énergétique mais surtout à la quantité de fer mise en solution lors de l'électrocoagulation, des tests complémentaires ont été réalisés. Il s'agissait ici de tester des intensités de courant élevées (4 et 6 A) durant de courtes périodes (5,

10, 15, 20 et 30 min). La teneur en ST du lisier tamisé dilué était de 2,2% ST. Les tests ont été réalisés en duplicata.

2.5.5 Optimisation de la durée de la décantation

Différents temps de décantation (60, 90 et 120 min) du lisier traité par électrocoagulation ont été explorés. La teneur en ST du lisier tamisé dilué a été fixée à 1,6% ST et l'intensité de courant à 3 A. Les essais ont été effectués en duplicata.

2.5.6 Électrocoagulation du lisier bovin à l'échelle pré-industrielle

Afin d'évaluer la possibilité de poursuivre avec la filière de séparation S/L du lisier bovin utilisant l'électrocoagulation, des tests supplémentaire ont été réalisés dans une cellule électrolytique en acrylique de forme parallélépipédique mesurant 20 cm de large, 40 cm de longueur et ayant une profondeur de 33 cm. Celle-ci peut recevoir un volume de liquide de 25 L (Figure 2.10). Ce montage comprend quatorze électrodes parallèles planes et rectangulaires en acier doux avec une distance inter-électrode de 1 cm.

Figure 2.10 **Cellule électrolytique utilisée pour les tests d'électrocoagulation à l'échelle pré-industrielle**

Afin d'optimiser le traitement et de simuler le mode de traitement adapté à ce type de technologie lorsqu'elle s'applique à l'échelle industrielle, un système de recirculation a été mis au point. À l'aide d'une pompe péristaltique, la matière en traitement est recirculée dans la cellule. Le liquide est récupéré en haut du montage, au sommet de la cellule et grâce à un tuyau inséré au bas de la cellule, le liquide contenant la matière à coaguler est réinjecté au bas du montage. Une intensité de 53,7 A est imposée en mode MP durant une période de 60 min. Un débit de circulation du lisier tamisé dilué compris entre 500 et 700 mL min^{-1} est appliqué.

Deux méthodes de récupération des solides coagulés ont été étudiées. La décantation du volume total a été réalisée dans une cuve cylindrique, puis la récupération des solides à l'aide d'un tamis de maillage 0,5 mm a été évaluée. Le surnageant représente la fraction liquide finale du traitement, tandis que la portion décantée ainsi que la mousse compacte concentrée au-dessus du liquide sont considérés comme étant la fraction solide. Afin d'évaluer les performances de ces tests complémentaires, un prélèvement a été réalisé sur chaque fraction, afin d'évaluer la concentration en ST et en MES (fraction liquide).

2.6 Mesures analytiques

Les solides totaux (ST) ont été mesurés selon le protocole 2540B de l'APHA (1999). Les matières en suspension (MES) ont été mesurées suivant la méthode 2540D (APHA, 1999) avec des membranes Whatman 934-AH de 1,5 µm de porosité.

Les mesures de pH 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).

La technique de digestion pour l'analyse de l'azote Kjeldahl (NTK), qui comprend l'azote organique et l'ammonium, a été tirée de la méthode Block Digestor QuickChem 13-107-06-2-D. Un échantillon certifié de nutriments 4022 (lot 43088-43089) a été digéré comme contrôle. Les NTK et azote ammoniacal (NH_4) ont été quantifiés sur un autoanalyseur Technicon de Lachat Instruments (Loveland, CO, États-Unis) en utilisant la méthode QuickChem 10-107-06-2-B (NH_4, NTK). Le PO_4 a été dosé sur un autoanalyseur Technicon de Lachat Instruments (Loveland, CO, États-Unis) la méthode suivie est la QuickChem 10-115-01-1-B (PO_4).

2.7 Étude technico-économique

La mise au point de nouvelles filières de traitement de matrices polluées requiert une bonne connaissance de l'économique associée à l'exploitation de telles technologies.

2.7.1 Schéma de procédé

La première étape de l'étude technico-économique d'une filière de traitement consiste à préparer un schéma de procédé complet présentant l'ensemble des étapes de la filière. Tous les intrants et les extrants doivent être identifiés. Les intrants désignent la matrice à traiter, l'eau de procédé, les produits chimiques; tandis que les extrants comprennent les matrices traitées, les sous-produits de traitement, les effluents gazeux et aqueux, etc. Il est important également d'identifier les solutions ou solides recirculés à l'intérieur du procédé.

2.7.2 Définition des paramètres opératoires et d'exploitation

Pour développer un modèle efficace d'évaluation technico-économique d'une filière de traitement il faut définir plusieurs paramètres ou variables. Ces dernières permettent d'évaluer les critères financiers selon différents scénarios d'exploitation du procédé. Parmi les variables à définir, il y a dans un premier temps les paramètres d'exploitation de base:

- Période d'opération (FJOA) (jrs an^{-1});
- Capacité de traitement de l'usine (FCAJ) (t jr^{-1} ou m^3 jr^{-1});
- Nombre d'heures d'opération par jour (FNHO) (h jr^{-1});
- Facteur d'efficacité d'opération (FEFF) (%);
- Revenus unitaire de traitement (REUN) (\$ t^{-1} ou \$ m^{-3}).

Des paramètres de marché de base doivent également être identifiés comme variables. Les principaux paramètres de cette catégorie sont identifiés ci-dessous:

- Taux d'inflation annuel (FINF) (% an^{-1});
- Taux d'intérêt annuel (FINT) (% an^{-1});
- Taux d'escompte annuel (FTES) (% an^{-1});
- Imposition sur le revenu (FIMP) (% des revenus bruts);
- Taux d'échange (FTAC) (\$US \$$Can^{-1}$);
- Marshall and Swift Equipment Cost Index (MSECI) (indice actualisé).

Une étude technico-économique doit aussi prendre en compte les paramètres de capitalisation:

- Période d'amortissement (FAMO) (années);
- Durée de vie des équipements (FVIE) (années);
- Fonds de roulement (FROP) (% des coûts fixes en capitaux).

Les paramètres pour l'évaluation des coûts directs d'opération sont les suivants:

- Coûts unitaires de produits chimiques (FCPA) (\$ kg^{-1});
- Coût unitaire de la main d'œuvre (FTMO) (\$ h^{-1});
- M.O. pour l'entretien (FSUB) (% M.O. opération);
- Coût unitaire de l'électricité (FCUE) (\$ kWh^{-1});
- Coût unitaire de l'eau de procédé (FEAU) (\$ m^{-3});
- Coût unitaire du gaz naturel (FPDI) (\$ $MBtu^{-1}$);

- Coût unitaire de gestion des déchets et produits:
  - Transport et disposition de déchets réguliers (FTDR) ($ t-1);
  - Transport et disposition de déchets spéciaux (FTDS) ($ t-1);
  - Transport et disposition de déchets dangereux (FTDD) ($ t-1);
- Entretien et réparation (FMAI) (% capital an^{-1});
- Matériaux courants (FMCO)(% capital an^{-1});
- Frais de laboratoire (FLAB) (% M.O. opération);
- Brevets et redevances (FBRR) ($ t^{-1} ou $ m^{-3}).

Les critères pour l'évaluation des coûts indirects et généraux doivent également être pris en considération. Il s'agit de:

- Dépenses administration (FSAD) (% M.O. opération et supervision);
- Avantages sociaux et marginaux (FASM) (% M.O. opération et supervision);
- Frais généraux (FADM)(% M.O. opération et supervision);
- Assurances et taxes (FASS) (% coûts fixes en capitaux an^{-1});
- Marketing et ventes (FMAV) (% coûts totaux);
- Recherche et développement (FRED) (% coûts totaux).

Plusieurs critères techniques spécifiques doivent être identifiés pour chaque étape du procédé. Par exemple, il s'agit de paramètres tels que le temps de rétention hydraulique (TRH), la siccité des boues ou résidus après déshydratation, le contenu en solides de fractions, la consommation des réactifs chimiques, les temps de stockage des solutions et des résidus, etc.

2.7.3 Bilans massique et volumique

Une étude technico économique comprend la mise au point d'un bilan massique et volumique. Présenté sous forme de tableau élaboré sur un chiffrier, le bilan massique présente pour chaque étape (intrants et extrants inclus), les éléments suivants:

- Volume (L);
- Masse humide (kg);
- Poids sec (kg);
- Solides totaux (% p p^{-1});
- Densité (kg L^{-1}).

Le bilan massique et volumique est exprimé pour un volume ou une masse spécifique de matrice traitée. Le bilan doit contenir un calcul du bilan des volumes, des masses humides et des poids secs de tous les intrants et extrants.

2.7.4 Dimensionnement des équipements

Le dimensionnement des équipements dépend du mode de fonctionnement et de la capacité de traitement du procédé. Cette dernière étant liée au temps d'utilisation, cette partie inclut l'étude du temps horaire d'utilisation de l'équipement (TEHU) (min h^{-1}). La variable FNHO (nombre d'heures d'opération par jour) (h jr^{-1}) permet d'indiquer si le procédé est opéré à temps partiel ou à complet. Le facteur de sécurité (FASE) est un facteur de surdimensionnement d'une valeur de 20% qui sert à prendre en compte d'éventuelles fluctuations aux niveaux des opérations.

2.7.5 Coûts en capitaux

2.7.5.1 Estimation du coût d'achat et de transport des équipements

Le coût d'achat des différents équipements (CATE) inclut les coûts de transport. Il peut être déterminé à l'aide de l'Équation 2.1.

Équation 2.1 $\mathbf{CATE = X \times (CAP)^{y} \times (MSECI)_{(a/o)}}$

X: Constante de coût pour l'équipement considéré;

Y: Facteur de mise à l'échelle;

CAP: Capacité de l'équipement;

$MSECI_{(a)}$: Valeur actualisée de l'indice Marshall and Swift Equipment Cost Index;

$MSECI_{(o)}$: Valeur à l'origine de l'indice Marshall and Swift Equipment Cost Index.

L'indicateur économique Marshall and Swift Equipment Cost Index (MSECI ou M&S index) a été instauré en 1926 (valeur de 100) pour l'actualisation des prix d'achat des équipements dans différentes industries. Une valeur globale représentant l'ensemble des secteurs industriels est également disponible. Cet indice est mis à jour à tous les trimestres de chaque année et peut être consulté dans la revue Chemical Engineering (www.che.com). La valeur de l'indice MSECI était de 1477,7 et 1462,9 respectivement au premier et second trimestre de 2009.

2.7.5.2 Estimation du coût total d'investissement

Les facteurs multiplicatifs ou facteur de Lang permettent d'estimer les autres composantes du coût total d'investissement. Les coûts fixes totaux en capitaux (TCFC) sont obtenus par l'addition des coûts directs, indirects, des frais de gestion de construction et des frais contingents. Le coût total d'investissement (INVE) peut ensuite être obtenu en additionnant le montant de TCFC et le montant du fonds de roulement (TFOR).

2.7.5.3 Coûts directs

Le coût d'achat et de transport des équipements (CATE) ne constitue par la seule composante économique des coûts directs totaux en capitaux (CDTC). Ceux-ci comprennent également les frais d'installation et d'isolation des équipements, les coûts d'instrumentation et de contrôle, les

coûts pour les conduites et la tuyauterie, et les coûts associés au système électrique. De plus, les coûts directs doivent également prendre en considération les coûts associés à la construction des bâtiments de procédés et de services, l'acquisition du terrain et son aménagement, ainsi que les facilités et services.

2.7.6 Coûts directs d'opération

Les coûts directs d'opération (CADO) incluent une multitude de paramètres budgétaires, parmi lesquels se retrouvent les produits chimiques, la M.O. d'opération et de supervision, l'électricité, l'eau de procédé, les carburants, les frais de gestion et disposition des déchets, les coûts d'entretien et réparation, les matériaux courants, les frais d'analyses de laboratoire et les frais de brevets et redevances.

2.7.6.1 Coûts en produits chimiques

Ils sont obtenus par la multiplication du coût unitaire de chaque produit (FCPA) avec la consommation respective de chacun des dits produits. Le coût total en produits chimiques est ensuite obtenu en additionnant chacun des coûts pour chaque produit. Exprimé en $\$ m^{-3}$ ou $\$ t^{-1}$ de matrice traitée est multiplié par la capacité annuelle de traitement ($m^3 an^{-1}$ ou $t an^{-1}$), afin d'obtenir le coût annuel en produits chimiques (COPC) ($\$ an^{-1}$).

2.7.6.2 Coûts de main-d'œuvre d'opération

L'estimation des besoins en main-d'œuvre (M.O.) d'opération (exprimés en heures d'opération par jour) peut être obtenue en additionnant les besoins spécifiques à chaque équipement identifiés par différentes sources (Peters et Timmerhaus, 1991, Ulrich, 1984).

2.7.6.3 Coûts des utilités

Électricité

Le coût en électricité est basé sur la puissance installée de chaque équipement (kW) multiplié par le temps d'utilisation par jour ($h\,jr^{-1}$), ce qui donne la consommation énergétique par jour ($kWh\,jr^{-1}$) pour chacun des équipements. La consommation énergétique totale est obtenue en additionnant les consommations individuelles de chaque équipement. Coût annuel en électricité (COAE) s'obtient en multipliant la consommation énergétique totale par le nombre de jours d'opération par an (FJOA) et par le coût unitaire de l'électricité (FCUE).

Eau de procédé

Les coûts en eau de procédé sont calculés en multipliant le coût unitaire de l'eau de procédé (FEAU) ($\$\,m^{-3}$) par la consommation requise en eau de procédé (m^3 eau m^{-3} ou m^3 eau t^{-1} de matrice traitée) déterminée lors de l'établissement du bilan massique. Le coût annuel en eau de procédé (COEP) ($\$\,an^{-1}$) est ensuite obtenu en multipliant le coût en eau de procédé exprimé en $\$\,m^{-3}$ ou $\$\,t^{-1}$ de matrice traitée par la capacité annuelle de traitement (CAPA) ($m^3\,an^{-1}$ ou $t\,an^{-1}$).

Carburants

La consommation de carburants est établie à partir du bilan de masse de la filière de traitement. L'énergie requise pour le chauffage et/ou l'évaporation d'eau est calculée et exprimée en de Btu m^{-3} ou Btu t^{-1} de matrice traitée. Ce dépense énergétique est multiplié par le coût unitaire du carburant (FPDI) ($\$\,Btu^{-1}$) donnant le un coût de traitement exprimé en $\$\,m^{-3}$ ou $\$\,t^{-1}$. Le coût annuel en carburants (COCA) ($\$\,an^{-1}$) est obtenu en multipliant le coût de traitement exprimé en $\$\,m^{-3}$ ou $\$\,t^{-1}$ précédemment établi par la capacité annuelle de traitement (CAPA) ($m^3\,an^{-1}$ ou $t\,an^{-1}$).

Gestion des déchets

Le coût de gestion et disposition des déchets est calculé en multipliant le taux de production de chaque déchet (t déchet m^{-3} ou t déchet t^{-1} matrice traitée) par le coût unitaire de disposition de chaque type de déchet (FTDR, FTDS et FTDD) ($\$ t^{-1}$). Les déchets sont classés par déchets réguliers (environ 30 $\$ t^{-1}$), déchets spéciaux (environ 70 $\$ t^{-1}$) et déchets dangereux (environ 300 $\$ t^{-1}$).

Le coût total est ensuite obtenu en additionnant les coûts individuels ($\$ m^{-3}$ ou $\$ t^{-1}$). Ce coût total multiplié par la capacité annuelle de traitement (CAPA) ($m^3 an^{-1}$ ou $t an^{-1}$), permet de déterminer le coût annuel de gestion des déchets (COGD) ($\$ an^{-1}$).

2.7.6.4 Coûts d'entretien et réparation

La multiplication du facteur multiplicatif (FMAI) par le montant total d'investissement (INVE) donne les coûts annuels d'entretien et réparation (COER). Ces derniers sont divisés par 100. Les frais d'entretien et de réparation pour ce type de procédé représenteraient entre 2% et 10% de la valeur des coûts fixes totaux en capitaux (CFTC) (Peters et Timmerhaus, 1980; Ulrich, 1984).

2.7.6.5 Coûts en matériaux courants

Les coûts annuels en matériaux courants (COMC) sont obtenus par la multiplication du facteur multiplicatif (FMCO) par le montant total d'investissement (INVE). Cette valeur est divisée par 100. Les coûts en matériaux courants constitueraient entre 0,5% et 1,0% de la valeur des coûts fixes totaux en capitaux CFTC (Peters et Timmerhaus, 1980; Ulrich, 1984).

2.7.6.6 Frais de laboratoire

Les frais annuels de laboratoire (COLA) sont obtenus par le produit du facteur multiplicatif (FLAB) et du coût annuel de la M.O. d'opération. Cette valeur est ensuite divisée par 100. Les

frais de laboratoire représenteraient entre 10% et 20% du coût annuel de la M.O. d'opération (Peters et Timmerhaus, 1991; Ulrich, 1984).

2.7.6.7 Brevets et redevances

Le coût des brevets et redevances (COBR) est déterminé en multipliant le facteur multiplicatif FRED ($Can m^{-3}) par la capacité annuelle de traitement (CAPA) (m^3 an^{-1}). Le montant des redevances correspondrait à 1% à 3% du montant total des revenus issus de l'exploitation du procédé de traitement sous licence.

2.7.7 Coûts indirects et généraux

2.7.7.1 Dépenses d'administration

Les dépenses d'administration incluent les salaires du personnel administratif et du personnel de bureau, les coûts de l'ingénierie et des services légaux et les coûts des communications. Le montant en dépenses d'administration (SAPA) est estimé en multipliant le coût de la M.O. d'opération et supervision par le Facteur multiplicatif FSAD (dépenses d'administration) le tout divisé par 100. Selon Peters et Timmerhaus (1991), le montant de SAPA représente environ 15% du coût de la M.O. d'opération et de supervision.

2.7.7.2 Avantages sociaux et marginaux

Les avantages sociaux et marginaux (FSAM) incluent les assurances médicales, dentaires et invalidité, les contributions aux REER, les vacances, et la participation au programme d'assurance chômage. Ces charges sont obtenues par la multiplication du facteur multiplicatif FASM (% M.O. total), avec le coût de la M.O. d'opération et supervision, le tout divisé par 100. Le montant de FSAM représenterait entre 22% et 45% du coût total de la M.O. d'opération et de supervision (Ulrich, 1984).

2.7.7.3 Frais généraux

Les frais généraux (FGAD) comprennent les soins médicaux, la sécurité et protection, la restauration et récréation, le stockage, ainsi que la supervision de bâtiments. Ils sont éstimés à partir de la multiplication coût de la M.O. d'opération et supervision par le facteur multiplicatif FADM (% M.O. d'opération et de supervision), divisé par 100. Le montant de FGAD constituerait entre 30% et 50% du coût total de la M.O. (Peter et Timmerhaus, 1991; Ulrich, 1984).

2.7.7.4 Assurances et taxes

Le coût en assurances et taxes (FAAT) est estimé à partir du facteur multiplicatif FASS (% coûts fixes en capitaux an^{-1}), que multiplie la valeur des coûts totaux fixes en capitaux (TCFC), divisé par 100. Le coût des taxes et assurances représenterait entre 3% et 5% du montant de TCFC (Brown, 2007).

2.7.7.5 Marketing et ventes

Dans marketing et ventes (CMAV) sont inclus: les frais du bureau des ventes, les frais de représentation et le service après-vente. Il est estimé par la multiplication du facteur multiplicatif FMAV (% des coûts directs et indirects d'opération), par la valeur des coûts directs + indirects d'opération, divisé par 100. Les coûts de marketing et ventes représenteraient entre 2% et 20% des coûts directs et indirects d'opération (Peters et Timmerhaus, 1991).

2.7.7.6 Recherche et développement

Le coût de recherche et développement (CRED) est estimé en multipliant le facteur multiplicatif FRED (% des coûts directs et indirects d'opération), par la valeur des coûts directs + indirects

d'opération, divisé par 100. Selon Peters et Timmerhaus (1991), les coûts de R&D représenteraient environ 5% des coûts directs et indirects d'opération.

2.7.7.7 Amortissement

Le montant annuel de l'amortissement (CAAM) ($\$ an^{-1}$) est calculé en divisant le montant de l'investissement total (INVE) par la période d'amortissement (FAMO) (années).

2.7.7.8 Financement (intérêts)

Le coût annuel du financement est déterminé par le paiement des intérêts (CAFI) ($\$ an^{-1}$). Il se calcul en utilisant l'Équation 2.2. Elle prend en compte le taux d'intérêt annuel ($\% an^{-1}$) (FINT) et la période d'amortissement (années) (FAMO).

Équation 2.2 $$CAFI = ((INVE \times (1 + FINT/100)^{FAMO}) + INVE) / FAMO$$

2.7.8 Analyse de flux monétaire

Pour un scenario selon lequel le procédé à l'étude soit exploité dans le cadre d'une activité commerciale générant des revenus, l'analyse de flux monétaire permettrait d'en évaluer la profitabilité. Une analyse de flux monétaire avec un scénario d'exploitation du procédé pour une période de 10 ans a été réalisée durant cette étude.

Les paramètres suivants ont été pris en compte:

- Revenus d'exploitation;
- Coûts d'opération;
- Revenus bruts avant imposition;
- Imposition;

- Revenus nets après imposition;
- Coûts en capitaux;
- Flux monétaire net;
- Paramètres de performance économique.

CHAPITRE 3 RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1 Approvisionnement en lisier et séquence optimale de pré-tamisage

En assumant l'hypothèse selon laquelle la majorité du P présent dans le lisier bovin se retrouve sous la forme particulaire, la première étape du procédé se doit de retenir le plus de particules au sein des fractions solides, afin de retirer le maximum de nutriments.

Les fractions solides issues de l'étape de pré-tamisage présentent des concentrations en ST variant entre 12 et 14% ST. En effet, quelques soit l'agencement au niveau de la séquence des tamis, le tamisage produit des fractions solides avec une siccité supérieure ou égale à 12% ST (Tableaux 3.1 à 3.9).

Au cours de cette étude, les résidus solides issus de l'étape de pré-tamisage d'un lisier de vaches laitières élevées sur litières de pailles de céréales hachées et présentant une concentration ≥12% ST, étaient suffisamment consistants pour être facilement transportés à la pelle ou dans une benne. Les Figures 3.1, 3.4 et 3.6 montrent plusieurs photos présentant les résidus solides post-tamisage. Ces derniers présentent la consistance nécessaire pour être pelletables.

Figure 3.1 **Lisier brut avant tamisage et résidus après tamisage par vibration, au laboratoire et au pilote**

Dans l'objectif de réduire les délais de traitement, les tests au laboratoire concernant l'étape de pré-tamisage ont été réalisés par un passage sur une séquence n'excédant pas deux tamis. Le premier tamis sert à éliminer les matières grossières, tels que les brins de pailles, les tiges et les épis, tandis que le second permet de se débarrasser des plus petites particules, tels les grains de céréales, les pailles fines et les grains de sable.

Tableau 3.1 **Siccité (% p/p) des fractions issues de l'étape de pré-tamisage pour la séquence 1 (3,18 mm – réceptacle); t = 15 min; vol = 1000 mL**

Fractions	Essais 1	Essais 2	Essais 3	Moyenne
Lisier brut (1 L)	9,2	9,2	9,2	9,2± 0,0
Fraction > 3,18 mm	12,3	14,0	11,2	12,5 ± 1,4
Fraction liquide (0,6 L)	8,1	7,6	7,4	7,7 ± 0,4

Tableau 3.2 **Masses humides (g) des fractions issues de l'étape de pré-tamisage pour la séquence 1 (3,18 mm – réceptacle); t = 15 min; vol = 1000 mL**

Fractions	Essais 1	Essais 2	Essais 3	Moyenne
Lisier brut (1 L)	1081	1074	1102	1086 ± 15
Fraction > 3,18 mm	307	332	376	338 ± 35
Fraction liquide (0,6 L)	632	615	547	598 ± 45

La séquence 1, ne contenant qu'un seul tamis (3,18 mm – réceptacle) ne pouvait convenir car elle génère un résidu avec une concentration en ST élevé (Tableaux 3.1). Les particules présentes dans le liquide résiduel issu de cette séquence (pailles, grains, etc.) auraient altérées les étapes subséquentes de traitement. Les morceaux de pailles, grains et autre particules altèrent l'homogénéité du liquide pré-tamisé et nuisent au processus de formation des flocs.

Tableau 3.3 **Siccité (% p/p) des fractions issues de l'étape de pré-tamisage pour la séquence 2 (3,18 mm – 1 mm – réceptacle); t = 15 min; vol = 1000 mL**

Fractions	Essais 1	Essais 2	Essais 3	Moyenne
Lisier brut (1 L)	9,2	9,2	9,2	9,2 ± 0,0
Fraction > 3,18 mm	12,2	13,3	12,9	12,8 ± 0,6
Fraction > 1 mm	11,9	12,2	12,4	12,2 ± 0,2
Fraction liquide	6,5	7,2	6,7	6,8 ± 0,4

Tableau 3.4 **Masses humides (g) des fractions issues de l'étape de pré-tamisage pour la séquence 2 (3,18 mm – 1 mm – réceptacle); t = 15 min; vol = 1000 mL**

Fractions	Essais 1	Essais 2	Essais 3	Moyenne
Lisier brut (1 L)	1101	1071	1081	1084 ± 15
Fraction > 3,18 mm	398	307	331	345 ± 47
Fraction > 1 mm	98	106	82	95 ± 12
Fraction liquide (0,52 L)	384	482	485	451 ± 57

Pour les séquences testées au laboratoire, la plus grande portion de solides est retenue sur le tamis 3,18 mm avec un peu plus de 30% MH du lisier brut (Tableaux 3.4, 3.6 et 3.8). Une proportion de 8,7% MH du lisier brut se retrouve sur le deuxième tamis (1 mm) de la séquence 2 et une proportion de 18% MH du lisier brut est retenue par le deuxième tamis (0,5 mm) de la séquence 3. (Tableaux 3.6 et 3.8). Les séquences 3,18 mm – 1 mm – réceptacle et 3,18 mm – 0,5 mm – réceptacle offrent de bonnes conditions de pré-traitement (Tableaux 3.3 et 3.5). Les solides se récupèrent en deux fractions présentant des siccités comprises entre 12 et 13% ST.

Tableau 3.5 **Siccité (% (p/p)) des fractions issues de l'étape de pré-tamisage pour la séquence 3 (3,18 mm – 0,5 mm – réceptacle); t = 15 min; vol = 1000 mL**

Fractions	Essais 1	Essais 2	Essais 3	Moyenne
Lisier brut	9,2	9,2	9,2	9,2 ± 0,0
Fraction > 3,18 mm	13,4	12,7	12,7	12,9 ± 0,4
Fraction > 0,5 mm	12,2	12,0	11,7	12,0 ± 0,2
Fraction liquide	6,4	5,4	6,1	6,0 ± 0,5

Tableau 3.6 Masses humides (g) des fractions issues de l'étape de pré-tamisage pour la séquence 3 (3,18 mm – 0,5 mm – réceptacle); t = 15 min; vol = 1000 mL

Fractions	Essais 1	Essais 2	Essais 3	Moyenne
Lisier brut	1053	1041	1060	1051 ± 10
Fraction > 3,18 mm	273	291	311	341 ± 16
Fraction > 0,5 mm	175	197	194	189 ± 12
Fraction liquide	456	424	398	426 ± 29

La séquence 3 (3,18mm – 0,5 mm) permet de retenir 50% MH à partir du lisier brut et génère un liquide final ayant 6,0 ± 0,5% ST (Tableaux 3.5 et 3.6). La séquence 2 (3,18mm – 1 mm) retient 40% de solides à partir du lisier brut et génère un liquide final ayant 6,8 ± 0,4% ST (Tableaux 3.3 et 3.4). L'utilisation d'un tamis de 0,5 mm à la place d'un tamis de 1 mm, en plus de retenir plus de particules, n'affecte pas significativement la vitesse de passage du lisier à travers la séquence de tamis, la séquence 3,18 mm – 0,5 mm – réceptacle a été retenue comme séquence de référence pour le pré-traitement au sein des filières concernant les essais de séparation S/L du lisier bovin au laboratoire.

Durant les travaux réalisés au pilote, les tamis ayant un maillage identique à ceux qui ont été déterminés au laboratoire n'étaient pas disponibles. En fonction des maillages disponibles et afin d'obtenir les mêmes performances de pré-tamisage que celles observées au laboratoire, une séquence 5 mm – 2 mm – 0,5 mm a été déterminée comme séquence de pré-tamisage pour les essais à l'échelle pré-industrielle.

Tableau 3.7 **Siccité (% p/p) des fractions issues de l'étape de pré-tamisage à l'échelle préindustrielle; séquence 4 (5 mm – 2 mm – 0,5 mm – réceptacle); t = 15 min; vol = 40 L**

Fractions	Essais 1	Essais 2	Essais 3	Moyenne
Lisier brut (40 L)	10,6	9,4	9,0	9,6 ± 0,8
Fraction > 5 mm	14,1	14,9	14,1	14,4 ± 0,5
Fraction > 2 mm	13,4	13,4	12,0	12,9 ± 0,8
Fraction > 0,5 mm	13,1	13,3	12,2	12,9 ± 0,6
Fraction liquide (22 L)	7,8	7,0	5,7	6,8 ± 1,1

Tableau 3.8 **Masses humides (kg) des fractions issues de l'étape de pré-tamisage à l'échelle préindustrielle; séquence 4 (5 mm – 2 mm – 0,5 mm – réceptacle); t = 15 min; vol = 40 L**

Fractions	Essais 1	Essais 2	Essais 3	Moyenne
Lisier brut (40 L)	35,8	38,9	39,5	38,1 ± 2,0
Fraction > 5 mm	11,5	9,6	10,0	10,4 ± 1,0
Fraction > 2 mm	2,3	2,8	2,5	2,5 ± 0,2
Fraction > 0,5 mm	1,8	2,3	2,6	2,2 ± 0,4
Fraction liquide (22 L)	18,1	22,0	23,0	21,0 ± 2,6

L'étape de pré-tamisage au pilote permet de retenir approximativement 40% MH de solides à partir du lisier brut et génère un liquide résiduel présentant 6,8 ± 1,1% ST (Tableaux 3.7 et 3.8). Ces résultats démontrent que le pré-tamisage au pilote reflète les performances obtenues au laboratoire. La siccité des solides retenus sur les tamis au pilote est supérieure à celles obtenues au laboratoire. Ceci est dû au mode de vibration qui est nettement plus puissant au pilote qu'au laboratoire.

Tableau 3.9 **Teneurs moyennes en P_{tot} et N-NTK pour le lisier brut et la fraction liquide tamisée lors des essais de pré-tamisage**

Fractions		Séquence 1	Séquence 2	Séquence 3	Séquence 4	Pilote
Lisier brut (g kg^{-1})	P_{tot}	8,9 ± 1,3	8,9 ± 1,3	8,9 ± 1,3	8,9 ± 1,3	5,9 ± 0,8
	N-NTK	52,0 ± 8,8	52,0 ± 8,8	52,0 ± 8,8	52,0 ± 8,8	37,6 ± 4,3
Fraction liquide (g L^{-1})	P_{tot}	0,7 ± 0,1	0,7 ± 0,1	0,7 ± 0,1	0,9 ± 0,1	0,6 ± 0,1
	N-NTK	3,9 ± 0,7	4,3 ± 0,5	4,0 ± 0,1	5,4 ± 0,5	4,0 ± 0,1
Nombre d'essais (*n*)		2	2	2	2	2

Les tests et analyses réalisés à ce stade permettent d'établir les moyennes des taux d'enlèvement en nutriments d'intérêt obtenus grâce au pré-traitement. Ainsi, en comparant les quantités de P et N dans le lisier brut avec celles présentes dans le liquide résiduel, il est possible de confirmer qu'au laboratoire, la séquence 3 (3,18 mm – 0,5 mm) a permis de concentrer approximativement 99% du P_{tot} et 92% du N-NTK dans les fractions solides sur les tamis. Au pilote, il a été possible de concentrer approximativement 90% du P_{tot} et 89% du N-NTK retenus dans les trois fractions solides lors de l'étape de pré-tamisage (Tableau 3.9).

L'étape de pré-tamisage est nécessaire car elle permet de se débarrasser de la paille, des résidus alimentaires, des excréments et autres particules de grande taille qui peuvent nuire aux processus d'électrocoagulation et de floculation (Figure 3.1). Faisant partie intégrante du procédé, l'étape de pré-tamisage permet de retirer en moyenne 40% MH du lisier brut, dépendamment de la concentration en ST du lisier avant le tamisage. La méthode de pré-tamisage exploitée au cours des essais a servi comme indicateur afin de permettre d'évaluer l'efficacité de l'étape de pré-tamisage. Toutefois, l'exploitation du procédé à l'échelle industrielle nécessitera l'emploi d'une technique de tamisage plus efficace comme le tamisage rotatif à l'aide de tambour. La Figure 3.2 montre un exemple de ce type de système de séparation offert par la compagnie EMO,

spécialisée en ingénierie du traitement des eaux. Le tamis rotatif est constitué d'un tambour filtrant rotatif dont le maillage varie de 0,25 à 4,0 mm. Après avoir traversé le caisson de répartition, le liquide arrive sur un déversoir sur le quart supérieur du tambour. L'eau traverse la grille, tandis que les solides se déposent sur la grille, puis dans un réservoir externe par l'entremise d'un grattoir. Le liquide tamisé traverse le tambour à contre-courant assurant le nettoyage de la grille (Environnement Matériels Objectifs, 2012).

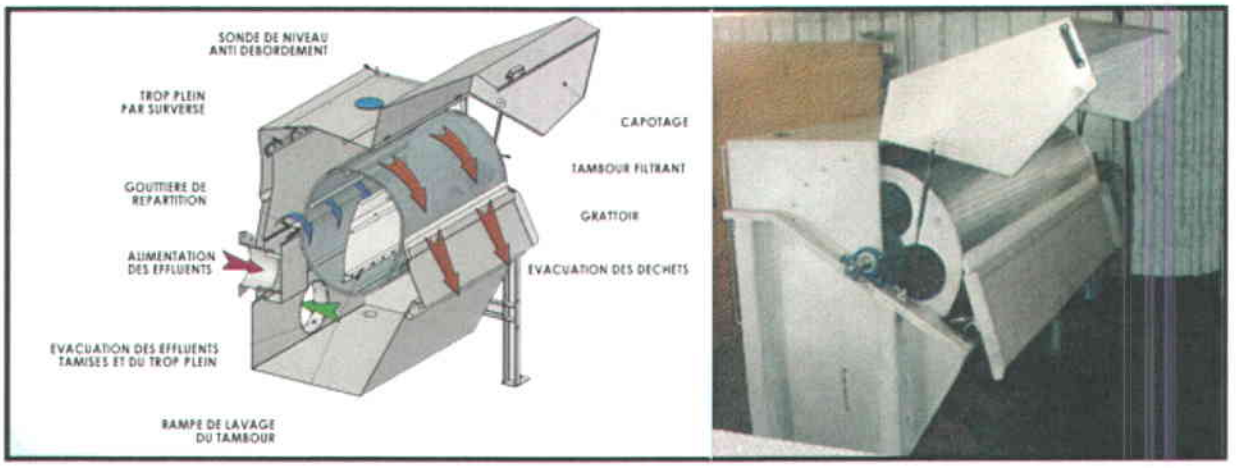

Figure 3.2 Tamis rotatif conçu par Environnement Matériels Objectifs

3.2 Floculation du lisier pré-tamisé à l'aide de polymères

3.2.1 Sélection du polymère synthétique de référence

La Figure 3.3 présente les étapes principales de la floculation utilisant le polymère Zetag, telles que réalisées lors des essais au laboratoire. L'agglomération des particules solides en un amas de flocs solidaires y est observable.

Figure 3.3 **PAM en solution et formation d'un amas de flocs sur tamis (maillage de 0,5 mm) à partir du lisier tamisé dilué**

Pour des volumes identiques de lisier à traiter, les solides retenus après floculation à l'aide de Zetag ayant un PM ultra-élevé (8180, 8185, 8190) semblent présenter une plus grande quantité d'eau que les masses retenues sur les tamis après floculation. Ceci se constate par les différences

au niveau des valeurs de ST des phases solides pour un même volume de lisier traité. (Tableau 3.10). Il est envisageable que les PAM de PM ultra-élevé, présentant plus de charges, interagissent avec plus de molécules environnantes, créant en réseau de ramifications plus important. Ces interactions physico-chimiques expliqueraient la rétention de plus de molécules d'eau (H_2O) par les PAM de PM ultra-élevé en comparaison avec ceux de PM moins élevé.

Tableau 3.10 Tests de floculation réalisés avec différents polymères synthétiques

Paramètres	Zetag						
	7557	7587	7689	7654	8180	8185	8190
Fraction solide							
Masse humide (g)	27,0 ± 0,8	29,0 ± 2,3	16,0 ± 2,2	30,0 ± 1,5	29,0 ± 0,5	30,0 ± 2,2	27,1 ± 0,4
ST (%)	8,4 ± 0,3	6,8 ± 0,6	8,0 ± 0,3	8,6 ± 0,1	6,9 ± 0,2	6,7 ± 0,1	6,7 ± 0,1
Masse sèche (g)	2,3 ± 0,1	2,0 ± 0,1	1,3 ± 0,2	2,6 ± 0,1	2,0 ± 0,1	2,0 ± 0,2	1,8 ± 0,1
Fraction liquide							
Volume (mL)	330 ± 14	330 ± 0	330 ± 7	319 ± 1	318 ± 3	323 ± 24	330 ± 10
MES (g L^{-1})	6,3 ± 0,3	5,7 ± 1,0	8,3 ± 0,2	5,0 ± 0,3	4,8 ± 0,3	4,8 ± 0,1	5,0 ± 0,6
ST (%)	1,2 ± 0,1	1,2 ± 0,0	1,5 ± 0,1	0,9 ± 0,1	1,2 ± 0,3	1,2 ± 0,0	1,3 ± 0,0
Nombre d'essais (*n*)	2	2	2	2	2	2	2

La persistance dans l'environnement des polymères d'acrylamide augmente avec leur PM. Il s'agit d'un fait à prendre en compte car bien que les risques inhérents à l'exposition de PAM disséminés dans l'environnement n'aient pas été clairement démontrés, les quantités importantes de lisier à traiter vont occasionner la présence de PAM en quantité non négligeable dans l'environnement. Les PAM de PM ultra-élevé doivent donc être évités. De plus, ils ne présentent pas dans le cadre des présents essais, des caractéristiques de traitements supérieures aux autres PAM testés.

Le Zetag 7557 offre des résultats intéressants. Il permet de récupérer 2,3 ± 0,1 g MS de solide et génère un liquide résiduel à 1,2 ± 0,1% ST. Il s'agit d'un PAM de PM moyen (Tableau 2.2). Aussi, la qualité du liquide résiduel obtenu après floculation à l'aide de ce dernier est moindre que la qualité de celui obtenu en utilisant le Zetag 7654.

Pour la même quantité de lisier, l'utilisation du Zetag 7654 permet de retenir plus de solides (2,6 ± 0,1 g MS) que les autres polymères et d'obtenir un liquide résiduel (0,9 ± 0,1% ST, 5,0 ± 0,3 g MES L^{-1}) présentant des caractéristiques intéressantes concernant les objectifs de cette recherche (Tableau 3.3). Tout en assurant un enlèvement optimal des MES ce dernier répond aux exigences de traitement et a déjà montré de bons résultats pour d'autres types de lisier, notamment au sein des laboratoires de l'INRS-ETE (Pinatton, 2007).

3.2.2 Paramètres optimaux pour la floculation à l'aide des polymères synthétiques

3.2.2.1 Concentration de polymère (% (v/v)) à ajouter au lisier pré-tamisé et dilué

La qualité des liquides résiduels ainsi que les quantités de matières solides retenues par tamisage après floculation montrent la corrélation entre la concentration (% v/v) de polymères et l'efficacité du traitement (Tableau 3.11). En effet, pour une concentration de 15% (v/v) de PAM, le liquide résiduel présente 13,8 ± 1,2 g MES L^{-1} et 1,8 ± 0,3% ST. Pour 25% (v/v) de PAM, le liquide résiduel concentre 2,4 ± 0,2 g MES L^{-1} et 0,7 ± 0,1% ST. Il serait logique en terme d'efficacité de traitement de retenir une concentration de 25% de PAM. Pour une ferme produisant annuellement 22 000 t de lisier, une économie de 20 000 $CAN en moyenne serait réalisée annuellement en utilisant une concentration de 20% (v/v) de PAM versus 25% de PAM pour le traitement du lisier. Ce coût ne concerne que l'achat du polymère. Il faudra considérer l'augmentation reliée au transport et aux opérations due à une plus grande quantité de polymère à

manipuler. Selon les données de la ferme où ont été réalisés les échantillonnages, cela représente un ajout de 1,1 t de polymère en granule fin de plus par année à intégrer au processus. Ainsi, bien que les résultats obtenus à 25% (v/v) de PAM se rapprochent plus des objectifs de traitement fixés, par soucis d'économies et afin de minimiser l'emploi d'une trop grande quantité de PAM, le choix s'est porté sur une concentration de Zetag 7654 à 20% du volume total du mélange solution de polymère + lisier tamisé.

Tableau 3.11 Tests de floculation et de séparation S/L avec différentes proportions de PAM[a]

Paramètres	Ajout de la solution de polymère (% (v/v))[b]		
	15%	**20%**	**25%**
Coût en polymère ($ m^{-3})	1,8	2,2	2,7
Fraction solide			
Masse sèche (g)	1,8 ± 0,1	1,9 ± 0,2	2,7 ± 0,2
ST (%)	7,1 ± 0,3	7,7 ± 0,3	8,5 ± 0,2
Fraction liquide			
Volume (mL)	440 ± 10	450 ± 10	420 ± 9
MES (g L^{-1})	13,8 ± 1,2	7,7 ± 0,3	2,4 ± 0,2
ST (%)	1,8 ± 0,3	0,9 ± 0,2	0,7 ± 0,1
Nombre d'essais (*n*)	3	3	3

[a] Les essais ont été réalisés après tamisage (0,5 mm).

[b] La concentration en ST de la solution de lisier tamisé dilué a été fixée à 2% S.T.

3.2.2.2 Concentration (% ST) du lisier tamisé dilué avant le mélange avec le polymère

L'objectif étant d'enlever une partie des nutriments en utilisant un traitement simple à faible coût, une faible concentration de polymère est utilisée, d'où l'importance du pré-tamisage. Au sortir de l'étape de pré-tamisage, le lisier présente généralement une concentration comprise entre 4 et 6% ST. Réaliser la floculation d'un lisier pré-tamisé présentant une telle concentration

en ST s'avère être une tâche complexe. La concentration de particules est tellement importante par rapport à la quantité de polymères, que ce dernier ne peut se déployer efficacement en solution, ce qui génère un solide contenant trop d'eau sur le tamis et un liquide résiduel trop concentré.

Il est donc nécessaire de pratiquer une dilution du lisier après l'étape de tamisage. Les publications consultées faisant état de méthodes de traitement utilisant des polymères pour l'enlèvement des particules solides et des nutriments à partir d'un liquide résiduel à forte charge organique, bien que peu nombreuses, présentent des essais réalisés sur des liquides résiduels ayant des concentrations comprises entre 0,4 et 1,5% ST . Certains auteurs présentent des essais sur des liquides résiduels plus concentrés (jusqu'à 3,2% ST) mais ces derniers utilisent des concentrations plus élevées de polymère que celles imposées par les objectifs de traitement de la présente étude qui visent l'utilisation de polymère en sous-dosage (Garcia et al., 2008; Vanotti et al., 1996). Pour les essais en cours, la concentration de la solution de lisier pré-tamisée diluée n'excèdera pas les 20%.

Tableau 3.12 Tests de floculation et de séparation S/L sur différentes concentrations en solides de lisier pré-tamisé

Paramètres	Concentration en ST de la solution de lisier tamisé (g L^{-1})[a]			
	13	**15**	**18**	**20**
Coût en polymère (\$ m^{-3})	1,8	1,8	1,8	1,8
Fraction solide				
Masse sèche (g)	2,2 ± 0,1	2,0 ± 0,1	2,5 ± 0,1	3,9 ± 0,1
ST (%)	6,6 ± 0,2	7,6 ± 0,6	7,7 ± 0,3	9,0 ± 0,2
Fraction liquide				
Volume (mL)	442 ± 8	452 ± 10	452 ± 8	438 ± 9
MES (g L^{-1})	4,3 ± 0,2	4,0 ± 0,3	4,7 ± 0,3	5,1 ± 0,1
ST (%)	0,7 ± 0,1	1,1 ± 0,2	0,9 ± 0,1	1,2 ± 0,2
Nombre d'essais (*n*)	3	3	3	3

[a] Une proportion de 20% (v/v) des solutions de polymères a été ajoutée lors de tous les essais.

Une concentration de 2% ST dans le liquide résiduel ne semble pas nuire au processus de floculation. La quantité retenue de solides sur les tamis et présente dans le liquide résiduel est globalement proportionnelle à la concentration de solides dans le lisier tamisé dilué. Une augmentation des MES (de 4,3 ± 0,2 g L^{-1} à 5,1 ± 0,1 g L^{-1}) et des ST (de 0,7 ± 0,1% à 1,2 ± 0,2%) dans le liquide résiduel est constatée lors du passage d'un liquide dilué à 1,3% ST à un liquide dilué à 2,0% ST (Tableau 3.12). S'il fallait réaliser le traitement sur la ferme d'échantillonnage, il faudrait 17 500 L d'eau supplémentaire chaque année pour passer d'un lisier dilué de 2% ST à 1,3% ST, ceci afin de diluer les 22 000 m^3 de lisier annuellement produit.

Pour la suite des essais concernant la floculation à l'aide de PAM d'un lisier bovin pré-tamisé, le lisier pré-tamisé sera dilué à une concentration de 2,0% ST et sera traité par une solution de Zetag 7654 (1 g L^{-1}) à une concentration de 20% (v/v) du volume total de traitement (lisier tamisé + solution de polymère).

3.2.3 Essais de floculation à l'aide de polymères organiques naturels

L'ajout de la solution de Protanal L 20 semble provoquer la formation de flocs à peine visibles. Lors du traitement au Protanal L 20, le tamisage du mélange laisse une fine pellicule sur le tamis mais cette matière (floculée ou non) est trop liquide et quasiment impossible à prélever. Des quatre polymères organiques naturels (PON) testés, seul le chitosan présente de bons résultats. En effet, la formation de flocs en quantité importante est observée dans le mélange et les fractions solides et liquides générées sont presque identiques à celle produites lors de l'utilisation des PAM (Tableau 3.13). Les recherches bibliographiques confirment ces résultats car le chitosan semble être l'un des rares PON ayant fait l'objet d'applications sur des résidus hautement chargés en MO, tels les résidus pré-traités d'élevage porcins, bovins ou de boucheries. Certaines études portant sur l'utilisation de l'amidon modifié présentent des résultats intéressants mais les temps de contact polymères-résidus sont trop longs par rapport aux objectifs de traitement. L'utilisation d'un PON, tel que le chitosan, offre des avantages illimités en terme de traitement par floculation des liquides chargés, car il n'y a quasiment aucune restriction à l'application sur les terres de ce type de polymère naturel biodégradable.

Tableau 3.13 Qualité[a] des flocs obtenus lors des tests de floculation et de séparation S/L avec les PON à une concentration de 15% (v/v) de polymère (2 g L^{-1})

Paramètres	Protanal L 20	Protanal XL RB	NSIGHT C1	Chitosan High MW
Flocs	0,1	0	0	0,8
Solide	0,1	0	0	0,7
Liquide	0	0	0	0,7
Degrés de floculation	0,2	0	0	2,2

[a] La qualité des flocs est évaluée par une cote s'étalant de 0 (aucune floculation) à 3 (excellente floculation).

3.2.4 Évaluation du chitosan comme floculant du lisier bovin au sein d'un procédé de séparation S/L du lisier bovin

Lors de l'essai DK 81 (Tableau 3.14), au cours duquel un apport de 10% (v/v) d'une solution de chitosan HMW à 10 g L^{-1} a été effectué, des rendements de 89% d'enlèvement des ST, 65% d'enlèvement du P_{tot} et 70% du N-NTK ont été atteints à partir du lisier brut. Il convient de noter que le chitosan contient lui-même en moyenne 2% de N (masse sèche). Ceci fait légèrement augmenter la quantité de N en fin de procédé et peut altérer légèrement les bilans. Ces résultats sont très encourageants pour l'avenir des procédés de floculation. À moyen et à long terme, il sera possible de remplacer les PAM par des PON au sein d'une multitude de procédés de traitement de résidus industriels présentant une forte concentration de colloïdes en solution aqueuse. Cependant, le chitosan n'offre pas encore une floculation aussi efficace que les PAM. En effet, en utilisant le Zetag 7654 à une concentration cinq fois inférieure (Tableau 3.20), des rendements de $92 \pm 6\%$ d'enlèvement des ST; $76 \pm 3\%$ du P_{tot} et $57 \pm 5\%$ du N-NTK sont obtenus. Dans les mêmes conditions et pour une concentration cinq fois supérieure à celle du Zetag, le chitosan permet des rendements de $88 \pm 1\%$ d'enlèvement des ST, $64 \pm 3\%$ du P_{tot} et $57 \pm 5\%$ du N-NTK. Cette différence dans le pouvoir de floculation du Zetag versus le chitosan

peut se constater aussi dans la qualité du liquide final. Dans les même conditions (avec une concentration cinq fois inférieure), le traitement au Zetag permet d'obtenir un liquide ayant les caractéristiques suivantes: $1,4 \pm 0,3\%$ ST; $3,1 \pm 1,1$ g MES L^{-1}; $0,12 \pm 0,01$ g P_{tot} L^{-1}; $1,4 \pm 0,12$ g N-NTK L^{-1}. D'autre part, le liquide final obtenu après traitement au chitosan contient $1,8 \pm 0,1\%$ ST, $10,6 \pm 1,6$ g MES L^{-1}, $0,26 \pm 0,01$ g P_{tot} L^{-1} et $1,6 \pm 0,1$ g N-NTK L^{-1}. Les PAM offrent une meilleure rétention des MES et donc un liquide final de meilleure qualité que le chitosan HMW concernant les objectifs de traitement.

Tableau 3.14 Caractéristiques des fractions d'intérêt après traitement avec chitosan (10 g L^{-1}) comme PON

Fractions	DK 81	DK 83	DK 85	DK 87
Solide final				
Masse (g)	117	129	102	105
ST (%)	2,9	2,7	2,7	4,4
P_{tot} (g kg^{-1})	11,1	5,10	5,07	6,54
N-NTK (g kg^{-1})	105	69,7	94,5	65,4
Liquide final				
Volume (mL)	795	722	784	892
ST (%)	1,7	1,8	2	1,8
MES (g L^{-1})	9,45	11,7	13,8	12,9
P_{tot} (g L^{-1})	0,26	0,26	0,26	0,28
N-NTK (g L^{-1})	1,64	1,50	1,63	1,66
Rendement (%)				
ST (%)	88,8	88,3	90,5	93,0
P_{tot} (%)	65,0	63,2	63,2	66,3
N-NTK (%)	69,9	52,5	57,1	56,7
Volume d'acide acétique (mL)	2,0	1,6	0,8	0

Tableau 3.15 Caractéristiques des fractions d'intérêt après traitement utilisant le chitosan (8 g L^{-1}) comme PON

Fractions	DK 98	DK 88	DK 90	DK 92	DK 94
Solide final					
Masse (g)	98,8	68,3	90,4	78,7	54,7
ST (%)	6,7	4,1	2,7	2,8	3,1
P_{tot} (g kg^{-1})	15,8	4,7	6,3	3,5	15,2
N-NTK (g kg^{-1})	66,0	56,9	82,8	69,6	88,9
Liquide final					
Volume (mL)	779	824	815	856	858
ST (%)	1,4	1,8	1,7	1,8	1,8
MES (g L^{-1})	7,3	12,2	11,5	12,4	14,5
P_{tot} (g L^{-1})	0,19	0,22	0,16	0,21	0,22
N-NTK (g L^{-1})	1,14	1,55	1,24	1,41	1,43
Rendement (%)					
ST (%)	89,5	89,6	88,1	89,6	89,0
P_{tot} (%)	65,0	59,8	53,7	58,1	62,5
N-NTK (%)	58,1	51,7	50,6	48,7	69,2
Volume d'acide acétique (mL)	2,0	1,6	1,3	0,64	0,32

L'effet de l'acide acétique sur l'efficacité du chitosan ne fait aucun doute. Durant les essais DK81, DK97, DK98 et DK 99 (Tableaux 3.14 à 3.17) au cours desquels la concentration recommandée de 1% (v/v) d'acide acétique a été respectée, une meilleure rétention des MES et donc une meilleure performance du traitement a été observée.

Tableau 3.16 Caractéristiques des fractions d'intérêt après traitement utilisant le chitosan (5 g L^{-1}) comme PON

Fractions	DK 97	DK 80	DK 82	DK 84	DK 86
Solide final					
Masse (g)	92,5	81,4	74,2	59,2	75,1
ST (%)	6,7	3,3	3,5	4,0	4,0
P_{tot} (g kg^{-1})	14,0	11,3	9,42	10,9	14,3
N-NTK (g kg^{-1})	63,7	98,6	79,5	76,7	90,9
Liquide final					
Volume (mL)	813	829	871	843	813
ST (%)	1,6	1,8	1,8	0,6	1,6
MES (g L^{-1})	13,5	17,3	16,3	10,7	13,5
P_{tot} (g L^{-1})	0,23	0,26	0,26	0,26	0,3
N-NTK (g L^{-1})	1,53	1,85	1,48	1,76	1,53
Rendement (%)					
ST (%)	87,4	89,5	90,1	78,9	87,4
P_{tot} (%)	62,6	65,1	66,1	67,4	62,6
N-NTK (%)	66,8	66,2	60,8	74,5	66,8
Volume d'acide acétique (mL)	2,0	1,0	0,8	0,4	0

Bien que certains essais semblent fonctionner avec moins de 50% de la quantité d'acide acétique recommandée (Tableaux 3.14 à 3.16), la qualité du liquide final en terme de concentration de MES et de nutriments est, dans l'ensemble, meilleure lors de l'utilisation d'une concentration de 1% (v/v) d'acide acétique.

Tableau 3.17 Caractéristiques des fractions d'intérêt après traitement utilisant le chitosan (2 g L^{-1}) comme PON

Fractions	DK 99	DK 89	DK 91	DK 93	DK 95
Solide final					
Masse (g)	42,2	181	nd	nd	nd
ST (%)	7,0	6,5	nd	nd	nd
P_{tot} (g kg^{-1})	8,49	4,40	nd	nd	nd
N-NTK (g kg^{-1})	45,0	44,9	nd	nd	nd
Liquide final					
Volume (mL)	853	913	nd	nd	nd
ST (%)	1,5	1,7	nd	nd	nd
MES (g L^{-1})	9,2	11,5	nd	nd	nd
P_{tot} (g L^{-1})	0,23	0,19	nd	nd	nd
N-NTK (g L^{-1})	1,32	1,23	nd	nd	nd
Rendement (%)					
ST (%)	87,5	100	nd	nd	nd
P_{tot} (%)	64,2	57,4	nd	nd	nd
N-NTK (%)	49,5	44,6	nd	nd	nd
Volume d'acide acétique (mL)	2,0	0,40	0,32	0,16	0,08

Si le chitosan devait être utilisé au sein d'un procédé de floculation similaire, il serait recommandé de respecter la concentration de 1% (v/v) d'acide acétique pour la mise en solution du chitosan HMW. À de telles concentrations, l'acide acétique ne représente pas de risque pour l'environnement, ni pour la santé.

Malheureusement, les coûts liés à l'utilisation du chitosan sont trop élevés par rapport aux objectifs visés en termes de coût d'exploitation. En effet, un 1 kg de chitosan pour le traitement à l'étude coûte 4 $ de plus que le Zetag. De plus, pour arriver à des résultats satisfaisants, il faudrait utiliser 4 à 5 fois plus de chitosan (8 à 10 g L^{-1}; 10% v/v) que de Zetag (1 g L^{-1}; 20% v/v). À 2 et 5 g L^{-1}, le chitosan ne permet pas de retenir suffisamment de solides, et de nutriments sur le tamis après floculation (Tableaux 3.18 et 3.19). Bien que les valeurs des rendements ne

varient pas beaucoup en corrélation avec les concentrations de polymère (10 à 2 g L^{-1}), il faut noter que ces rendements tiennent compte du traitement au complet incluant l'étape de pré-tamisage qui, à elle seule, dépendamment des essais, permet de se débarrasser d'approximativement 40% des ST et de plus de 70% des P_{tot} et N-NTK. Il convient donc pour l'étape de floculation de ne pas se fier aux seuls rendements, mais aussi aux masses retenues et surtout à la qualité du liquide résiduel.

Cependant, son coût trop élevé et la quantité requise pour un traitement jugé efficace sont des contraintes incontournables. Une meilleure formulation du produit, plus efficace et moins coûteuse serait un atout dans la mise au point de procédés de floculation nécessitant l'emploi de PON.

3.2.5 Étude de reproductibilité de la filière au laboratoire

Le test de reproductibilité (Tableaux 3.18 et 3.19) réalisé sur la filière de traitement physico-chimique de séparation S/L du lisier bovin utilisant le Zetag 7654 comme agent floculant est concluant au regard des objectifs de traitement. L'étape de pré-tamisage se déroule rapidement et permet à elle seule de retenir sur les tamis une grande partie des solides et des nutriments qui sont à l'origine de la problématique à résoudre. Elle génère des résidus solides présentant une siccité de 12 ± 1% ST, ce qui en fait un résidu solide, transportable à la pelle et en camion benne. Avec une telle concentration en ST, les résidus n'auraient pas besoin de subir une étape de déshydratation supplémentaire avant d'être transportés.

L'étape de floculation génère un liquide final ayant des caractéristiques rejoignant les objectifs de traitement: ST: 1,45 ± 0,37%; MES: 3,1 ± 1,1 g L^{-1}; P_{tot}: 0,12 ± 0,01 g L^{-1}; N-NTK: 1,4 ± 0,1 g L^{-1} (Tableaux 3.19 et 3.20). Ce liquide résiduel, allégé en P et N, pourrait être utilisé

comme liquide d'engraissement au champ et causé beaucoup moins de dommages sur l'environnement que le lisier brut épandu tel quel au champ.

Tableau 3.18 Caractéristiques des fractions solides et liquides issues des étapes de pré-traitement du lisier bovin à l'aide d'un PAM (Zetag 7654 à 1 g L^{-1}) lors des tests de reproductibilité

Fractions	DK 70	DK 71	DK 72	Moyenne	Écart Type
Lisier brut					
Masse (g)	1000	1010	1000	1003	6
ST (%)	8,49	8,82	8,40	8,57	0,22
P_{tot} (g kg^{-1})	7,16	7,14	7,62	7,31	0,27
N-NTK (g kg^{-1})	35,6	44,1	44,8	41,5	7,1
Fraction > 3 mm					
Masse (g)	237	256	242	245	10
ST (%)	12,1	12,4	11,8	12,1	0,3
P_{tot} (g kg^{-1})	4,20	4,92	5,52	4,88	0,66
N-NTK (g kg^{-1})	26,6	36,5	36,5	33,2	5,7
Fraction > 0,5 mm					
Masse (g)	192	204	199	198	6
ST (%)	12,1	11,8	11,0	11,6	0,6
P_{tot} (g kg^{-1})	5,07	5,01	5,36	5,15	0,19
N-NTK (g kg^{-1})	23,8	31,0	38,2	31,0	7,2
Fraction liquide					
Volume (mL)	507	529	480	505	25
ST (%)	6,48	5,88	5,50	5,95	0,49
MES (g L^{-1})	64,8	38,2	47,3	50,1	13,5
P_{tot} (g L^{-1})	0,64	0,64	0,67	0,65	0,02
N-NTK (g L^{-1})	2,82	4,87	4,15	3,95	1,04

Le bilan massique de la série d'essais confirme la robustesse du procédé (Tableau 3.20). En effet, une bonne conservation des solides et des nutriments est observée au cours du procédé. Les légères pertes en N-NTK se justifient par l'instabilité d'une partie de l'azote qui s'échappe sous forme de NH_3, surtout lorsqu'il y a agitation du liquide. Les fractions solides générées par l'étape

de tamisage après floculation présentent des valeurs de 9,3 ± 2,3% ST. Afin d'obtenir une siccité supérieure à 11% ST, une étape de déshydratation et séchage à l'aide d'une vis sans fin pourra être utilisée. Aussi, l'utilisation d'un tamis tangentiel à la place des tamis conventionnels pourrait améliorer la séparation finale des solides floculés.

Tableau 3.19 Caractéristiques des fractions solides et liquides issues des étapes de floculation du lisier bovin à l'aide d'un PAM (Zetag 7654 à 1 g L^{-1}) lors des tests de reproductibilité

Fractions	DK 70	DK 71	DK 72	Moyenne	Écart type
Polymère					
Volume (mL)	254	265	240	253	13
Eau (mL)	507	529	480	505	25
Fraction solide					
Masse (g)	109	114	103	109	6
ST (%)	9,3	7,3	11,3	9,3	2,0
P_{tot} (g kg^{-1})	7,65	10,5	6,00	8,05	2,28
N-NTK (g kg^{-1})	19,8	28,6	16,9	24,2	6,2
Fraction liquide					
Volume (mL)	1116	1163	1056	1117	54
ST (%)	1,63	1,03	1,70	1,45	0,37
MES (g L^{-1})	2,70	4,40	2,25	3,12	1,13
P_{tot} (g L^{-1})	0,11	0,12	0,13	0,12	0,01
N-NTK (g L^{-1})	1,33	1,40	1,56	1,43	0,12
Rendement (%)					
ST (%)	94,7	85,3	95,1	91,7	5,6
P_{tot} (%)	73,1	79,0	75,2	75,7	3,0
N-NTK (%)	84,3	86,3	77,6	82,7	4,6

Le procédé semble donc être fonctionnel et opérationnel à l'échelle du laboratoire et présente des rendements intéressants. Il permet de concentrer une très grande partie des nutriments présents dans le lisier et d'obtenir un liquide avoisinant 3 g MES L^{-1}.

Tableau 3.20 Bilan massique et volumique des essais DK-70, DK-71 et DK-72

Paramètres	Intrants	Extrants	E/I (%)
Masse (g)	1758	1663	94,6
ST (g)	85,7	78,7	92,0
P (g)	0,57	0,34	75,3
NTK (g)	3,6	3,5	98,3

3.2.6 Essais en mode continu de la filière au laboratoire

Pour traiter un volume de 1 L de lisier brut, il faut approximativement 700 à 900 mL d'eau « neuve ». La moitié du volume de lisier brut est généralement récupérée après l'étape de tamisage. Ce lisier pré-tamisé est dilué pour atteindre la concentration cible avant la floculation (500 à 700 mL d'eau nécessaire). Il faut ajouter à cela les 200 mL de la solution de polymère. Les objectifs étant de mettre sur pied un procédé durable, il est nécessaire de palier à cette consommation importante d'eau.

L'utilisation du liquide final (après floculation), comme liquide de dilution, permettrait de réaliser une économie considérable d'eau. Il n'est pas recommandé d'utiliser cette eau pour la préparation de la solution de polymère qui devra se faire systématiquement à partir d'eau du robinet ou à partir de l'eau recirculée, mais préalablement filtrée. La présence de particules issues de l'étape de traitement aurait un impact négatif sur la mise en solution du polymère.

L'utilisation du liquide final pour diluer le lisier tamisé avant la floculation suivante permet une recirculation du liquide en boucle. (Tableau 3.22).

Tableau 3.21 Caractéristiques des fractions solides et liquides issues de l'étape de pré-traitement du lisier bovin à l'aide d'un PAM lors des essais en mode continu

Fractions	DK 74, Boucles 1 à 6
Lisier brut	
Masse (g)	1000
ST (%)	6,50
P_{tot} (g kg^{-1})	7,40
N-NTK (g kg^{-1})	49,5
Fraction > 3 mm	
Masse (g)	162
ST (%)	10,4
P_{tot} (g kg^{-1})	3,55
N-NTK (g kg^{-1})	37,4
Fraction > 0,5 mm	
Masse (g)	179
ST (%)	10,1
P_{tot} (g kg^{-1})	2,11
N-NTK (g kg^{-1})	34,4
Fraction liquide	
Volume (mL)	635
ST (%)	4,10
MES (g L^{-1})	23,8
P_{tot} (g L^{-1})	0,14
N-NTK (g L^{-1})	3,45

Le liquide résiduel recirculé a été considéré comme de l'eau dans le cadre de l'établissement des bilans de cette série d'essais (Tableaux 3.21 et 3.22). Ce fait pourrait expliquer les rendements supérieurs à 100% pour les ST des boucles 2 à 6. Les rendements s'appliquent au traitement complet, incluant l'étape de pré-tamisage (Tableau 3.22). Globalement, une augmentation graduelle des MES dans le liquide final a été observée, tandis que la concentration en nutriments reste relativement stable dans les liquides finaux au fil des boucles.

Tableau 3.22 Caractéristiques des fractions solides et liquides issues des étapes de pré-traitement du lisier bovin à l'aide d'un PAM (Zetag 7654 à 1 g L^{-1}) lors des essais en mode continu

Fractions	DK 74	Boucle 1	Boucle 2	Boucle 3	Boucle 4	Boucle 5	Boucle 6
Polymère							
Volume (mL)	318	318	318	318	318	318	318
Eau (mL)	635	0	0	0	0	0	0
Fraction solide							
Masse (g)	94,4	92,3	119	117	122	119	106
ST (%)	7,42	7,21	7,60	7,70	7,70	7,50	7,40
P_{tot} (g kg^{-1})	5,47	8,74	9,67	10,7	8,90	10,1	9,80
N-NTK (g kg^{-1})	39,1	44,6	44,5	47,7	41,0	46,2	47,0
Fraction liquide							
Volume (mL)	1232	1138	1116	1134	1118	1125	1121
ST (%)	1,15	2,00	1,93	1,90	2,10	2,00	2,10
MES (g L^{-1})	5,45	10,4	11,2	11,3	14,2	14,0	15,0
P_{tot} (g L^{-1})	0,10	0,14	0,05	0,13	0,11	0,13	0,15
N-NTK (g L^{-1})	0,68	1,06	0,48	1,50	1,40	1,50	1,60
Rendement (%)							
ST (%)	86,2	98,9	100	100	104	102	101
P_{tot} (%)	58,5	71,5	54,5	73,3	65,5	71,1	75,9
N-NTK (%)	38,2	54,1	38,5	70,9	62,0	67,8	70,4

Le procédé en boucle permet de maintenir des taux d'enlèvement satisfaisants concernant les particules. La boucle 6 qui présente le liquide finale avec le plus de MES a permis de retenir 65% des MES et 52% des ST à partir du liquide tamisé dilué.

La qualité du liquide résiduel en terme de MES n'est pas satisfaisante surtout que la concentration en MES du liquide final semble augmenter en passant progressivement de 5 à 15 g L^{-1}. Une telle concentration en MES n'est pas acceptable pour le procédé de séparation S/L à l'étude. Un effet d'accumulation des MES a été observé au fur et à mesure que les boucles se succèdent. Étant donné que cette augmentation des MES ne s'accompagne pas d'une augmentation significative de la concentration en nutriments, cette augmentation des MES

pourrait être attribuée aux particules résiduelles de polymère en suspension. Si ces MES étaient des nutriments ou des particules issues du lisier, une augmentation simultanée des MES et des concentrations en N-NTK et P_{tot} serait observée. Il est probable que des particules résiduelles de PAM (n'ayant plus d'affinité pour les particules de lisier en suspension) persistent dans le liquide final, se retrouvent en tête de procédé et s'accumulent au fur et à mesure que les boucles s'additionnent.

Afin d'atteindre les objectifs, il conviendrait peut être de rajouter une étape de tamisage ou de floculation en sous-dosage et tamisage (maillage plus fin que 0,5 mm) avant de recirculer le liquide.

3.2.7 Étude de la filière à l'échelle pilote

3.2.7.1 Étude de reproductibilité de la filière

Les essais réalisés au pilote pré-industriel sur le procédé physico-chimique de séparation S/L du lisier bovin utilisant les PAMs ont permis de concentrer approximativement 96% du P_{tot} et 95% du N-NTK dans des fractions solides, à partir du lisier brut.

Les fractions solides issues de l'étape de pré-tamisage présentent toutes des valeurs de ST supérieures à 12% ST, ce qui répond largement aux attentes (Figure 3.4). L'étape de pré-tamisage, telle que réalisée au pilote, a permis de traiter 40 L de lisier en 40 à 45 min.

Tableau 3.23 Caractéristiques des fractions solides et liquides issues des étapes de pré-traitement du lisier bovin à l'aide d'un PAM lors des tests de reproductibilité au pilote

Fractions	DK 126	DK 128	DK 129	Moyenne	Écart type
Bruts (caractéristiques)					
Masse (kg)	40	40	40	40	0
ST (%)	7,0	7,1	7,0	7,0	0,1
P_{tot} (g kg^{-1})	9,02	7,20	8,23	8,15	0,91
N-NTK (g kg^{-1})	55,8	46,8	52,7	51,8	4,6
5 mm (caractéristiques)					
Masse (kg)	5,0	5,5	5,8	5,4	0,4
ST (%)	13,8	14,9	14,0	14,2	0,6
P_{tot} (g kg^{-1})	4,8	6,3	4,2	5,1	1,1
N-NTK (g kg^{-1})	29,6	37,1	26,4	31,0	5,5
2 mm (caractéristiques)					
Masse (kg)	1,75	2,20	2,00	1,98	0,22
ST (%)	12,6	12,1	12,0	12,2	0,32
P_{tot} (g kg^{-1})	5,4	5,6	5,8	5,6	0,2
N-NTK (g kg^{-1})	27,5	29,2	29,8	28,8	1,2
0,5 mm (caractéristiques)					
Masse (kg)	2,00	1,65	1,85	1,83	0,17
ST (%)	13,0	13,0	13,4	13,1	0,2
P_{tot} (g kg^{-1})	5,6	6,3	6,1	6,0	0,4
N-NTK (g kg^{-1})	35,1	35,0	33,0	34,4	1,2
Liquide tamisé (caractéristiques)					
Volume (L)	31,0	30,0	29,2	30,1	0,9
ST (%)	4,7	6,6	7,0	6,1	1,2
MES (g L^{-1})	41,2	44,6	41,6	42,5	1,9
P_{tot} (g L^{-1})	0,60	0,74	0,58	0,64	0,09
N-NTK (g L^{-1})	4,1	4,0	3,8	4,0	0,2

Figure 3.4 **Fractions solides obtenues au pilote après l'étape de pré-tamisage**

Le procédé génère un liquide final résiduel ayant des concentrations de 0,32 ± 0,04 g P_{tot} L^{-1} et 2,1 ± 0,5 g N-NTK L^{-1} (Tableaux 3.23 et 3.24). Ces concentrations sont supérieures par rapport aux valeurs obtenues au laboratoire (0,12 ± 0,01 g P_{tot} L^{-1} et 1,4 ± 0,1 g N-NTK L^{-1}). Compte tenu de l'augmentation des volumes à traiter, des techniques de pré-tamisage et de tamisage post floculation, une baisse de la qualité du traitement et du liquide final était envisageable. Le pré-tamisage à très fortes secousses (occasionnées par un moteur puissant) produit des fractions moins humides qu'au laboratoire et laisse passer plus de particules. Une concentration de 13,7 ± 0,7% ST a été déterminée pour les fractions solides issues de l'étape de pré-tamisage au pilote, versus 11,9 ± 0,5% ST pour les fractions obtenues au laboratoire (Tableaux 3.18 et 3.23).

Les taux d'enlèvement des nutriments sont satisfaisants et comparables à ceux obtenus au laboratoire. Cependant, le liquide final présente des valeurs de 9,0 ± 0,4 g MES L^{-1} versus

3,1 ± 1,1 g MES L^{-1} pour le liquide final obtenu au laboratoire (Tableau 3.24). Ceci peut s'expliquer par une mauvaise utilisation du tamis tangentiel.

Tableau 3.24 Caractéristiques des fractions solides et liquides issues des étapes de floculation du lisier bovin à l'aide d'un PAM lors des tests de reproductibilité au pilote

Fractions	DK 126	DK 128	DK 129	Moyenne	Écart type
Polymère	**Zetag 7654**	**Zetag 7654**	**Zetag 7654**		
Volume (L)	2	2	2	2	0
Concentration de polymère (g L^{-1})	1	1	1	1	0
Ajout de polymère (g)	2	2	2	2	0
Eau (L)	6	6	6	6	0
Solide final tangentiel (caractéristiques)					
Masse (kg)	1,60	1,35	1,75	1,57	0,20
ST (%)	5,6	5,9	5,5	5,7	0,2
P_{tot} (g kg^{-1})	13,8	11,6	10,1	11,8	1,9
N-NTK (g kg^{-1})	56,4	53,0	54,0	54,5	1,7
Liquide final (caractéristiques)					
Volume (L)	7,7	8,6	7,9	8,1	0,5
ST (%)	2,9	2,8	2,7	2,8	0,1
MES (g L^{-1})	9,2	8,9	8,4	8,8	0,4
P_{tot} (g L^{-1})	0,34	0,35	0,27	0,32	0,04
N-NTK (g L^{-1})	2,5	2,3	1,6	2,1	0,5

Les fractions solides issues du tamis tangentiel présentent des pourcentages en ST de 5,7 ± 0,2% (Tableau 3.23). Ces résultats ne répondent pas aux attentes concernant l'utilisation du tamis tangentiel au sein du procédé. La Figure 3.5 présente le montage incluant le déversoir utilisé ainsi que les solides floculés retenus sur le tamis tangentiel. Cet outil est supposé assurer une séparation plus performante que les tamis conventionnels, tels que ceux utilisés au laboratoire. Or, ces derniers permettent d'obtenir des résidus moins chargés en eau après le tamisage du lisier pré-tamisé et floculé (Tableaux 3.19 et 3.23). Ces résultats peuvent s'expliquer par le fait qu'il

n'a pas été possible de respecter le débit recommandé par le fournisseur du tamis tangentiel. La pompe utilisée au laboratoire ne permettait pas de faire monter le lisier floculé en haut du montage.

Figure 3.5 Montage réalisé pour l'utilisation du tamis tangentiel

Les résultats obtenus sont encourageants. Le procédé est fonctionnel à l'échelle pilote, assure une bonne conservation de la matière (Tableau 3.25) et les taux de concentration des nutriments dans les fractions solides sont satisfaisants, donnant un liquide résiduel allégé en P_{tot} et en N-NTK.

Tableau 3.25 Bilan massique et volumique moyen des essais DK-126, DK-128 et DK-129

Paramètres	Intrants	Extrants	E/I (%)
Masse (kg)	51,0	49,0	96,0
ST (kg)	3,71	3,39	91,3
P (g)	22,8	17,8	78,5
NTK (g)	3,6	3,5	98,3

3.2.7.2 Essais en mode continu de la filière à l'échelle pilote

Cette série d'essais visait à observer le comportement du procédé opéré en boucle. L'étape de pré-tamisage n'a pas été étudiée mais uniquement l'étape de floculation utilisant les PAM. Seules les étapes subséquentes au pré-traitement sont présentées, incluant les caractéristiques du liquide à traiter, ce dernier étant issu d'un mélange avec le liquide résiduel de l'étape précédente.

Le procédé offre sensiblement les mêmes performances de traitement qu'au laboratoire (Tableau 3.26). Les concentrations en MES et les concentrations en nutriments dans les liquides finaux augmentent graduellement au fil des boucles. Le procédé en boucle est stable et permet de maintenir de bon taux d'enlèvement des MES. Cependant, la qualité du liquide résiduel en terme de MES n'est pas satisfaisante. Comme il a été observé au laboratoire, la concentration en MES du liquide final semble augmenter en passant de 8,6 à 10,5 g L^{-1} (Tableau 3.26). Une étape ultime de traitement a donc été insérée. Pour concentrer une portion des solides restants en suspension, le liquide final issu de la filtration avec le tamis tangentiel a été mélangé à 10% (v/v) d'une solution de PAM à 1 g L^{-1} par une agitation mécanique de 5 à 10 min, puis passé au travers d'un tamis de 250 µm de maillage.

Tableau 3.26 Caractéristiques des fractions solides et liquides issues de l'étape 1 des essais pilotes de floculation en mode continu du lisier bovin à l'aide d'un PAM

Paramètres	Boucle1	Boucle 2	Boucle 3	Boucle 4
Polymère 1	Zetag 7654	Zetag 7654	Zetag 8185	Zetag 8185
Volume (L)	2	2	2	2
Concentration de polymère (g L^{-1})	1	1	1	1
Ajout de polymère (g)	2	2	2	2
Eau (L)	6	6	6	6
Liquide tamisé dilué				
Volume (L)	4	4	4	4
ST (%)	1,9	2,2	2,6	2,9
MES (g L^{-1})	18,5	15,3	17,0	16,6
P_{tot} (g L^{-1})	0,40	0,35	0,39	0,42
N-NTK (g L^{-1})	1,7	1,8	2,1	2,6
Solide 0,5 mm (caractéristiques)				
Masse (kg)	1,1	1,0	0,8	0,6
ST (%)	4,4	5,2	6,2	7,0
P_{tot} (g kg^{-1})	16,1	14,0	13,2	11,5
N-NTK (g kg^{-1})	48,0	50,0	52,5	53,2
Liquide 0,5 mm tangentiel (caractéristiques)				
Volume (L)	8,2	8,5	8,6	8,7
ST (%)	1,5	1,7	2,1	1,9
MES (g L^{-1})	8,7	7,0	10,0	10,5
P_{tot} (g L^{-1})	0,20	0,23	0,30	0,26
N-NTK (g L^{-1})	1,2	1,5	2,1	1,9

Tableau 3.27 Caractéristiques des fractions solides et liquides issues de l'étape 2 des essais pilotes de floculation en mode continu du lisier bovin à l'aide d'un PAM

	Boucle1	Boucle 2	Boucle 3	Boucle 4
Polymère 2	Zetag 7654	Zetag 7654	Zetag 8185	Zetag 8185
Volume (L)	1	1	1	1
Concentration de polymère (g L^{-1})	1	1	1	1
Ajout de polymère (g)	1	1	1	1
Eau (L)	1	1	1	1
Solide final 250 µm (caractéristiques)				
Masse (kg)	0,40	0,39	0,39	0,17
ST (%)	6,1	6,3	6,2	8,6
P_{tot} (g kg^{-1})	14,1	14,0	13,7	12,8
N-NTK (g kg^{-1})	52,4	50,0	52,0	44,6
Liquide final 250 µm (caractéristiques)				
Volume (L)	8,8	8,8	8,5	8,5
ST (%)	1,1	1,0	1,3	1,5
MES (g L^{-1})	3,7	4,1	5,6	7,0
P_{tot} (g L^{-1})	0,14	0,18	0,22	0,21
N-NTK (g L^{-1})	1,12	1,24	1,60	1,42

L'ajout d'une deuxième étape de floculation à l'aide de PAM a permis de se rapprocher des objectifs de traitement. Les liquides finaux présentent des valeurs de MES comprises entre 3,7 et 7,0 g MES L^{-1}. Le liquide issu du tamisage tangentiel a également été allégé en ST, N-NTK et P_{tot} (Tableau 3.27).

Ces tests de séparation S/L du lisier bovin réalisés à l'échelle pré-industrielle confortent la position selon laquelle un tel procédé serait viable et profitable. Il fonctionne en boucle se déroule en quelques étapes simples et permet de concentrer plus de 70% du P_{tot} et du N-NTK dans des fractions solides. Il génère un liquide résiduel ayant moins de 0,2 g P_{tot} L^{-1} et moins de 2 g N-NTK L^{-1}.

3.2.7.3 Égouttage et séchage des fractions solides résiduelles

La Figure 3.6 présente les montages utilisés lors des tests réalisés sur l'égouttage et le séchage des fractions solides finales.

Figure 3.6 **Dispositifs pour: A séchage des résidus issus du pré-tamisage; B égouttage des solides floculés**

Les résultats présentés au Tableau 3.28 montrent que l'évaporation de l'eau à partir des fractions solides issues des différentes étapes de traitement du procédé se fait plus rapidement dans les fractions issues du pré-tamisage, qu'à partir de celles issues de la floculation. Ceci s'explique par le fait que l'eau s'évapore plus facilement à partir de résidus de pailles, qu'à partir d'un amas de particules sous formes de flocs. Au sortir du procédé, les fractions de l'étape de pré-tamisage présentent déjà des concentrations en ST satisfaisantes (> 12% ST). De plus, une concentration de 20% ST est atteinte au bout de 3 jours. Les résidus floculés passent, quant à eux, de 7,6 à 12% ST au bout de 3 jours (Tableau 3.28).

Tableau 3.28 **Siccité (% p/p) des fractions solides issues de l'étape de pré-tamisage pilote lors de l'évaluation de la perte d'eau à l'air libre**

Jours	5 mm	2 mm	0,5 mm	Solide floculé
1	14,1	13,4	13,1	7,6
2	14,7	15,0	15,3	10,2
3	21	23	19	12

3.3 Détermination des conditions optimales d'électrocoagulation

3.3.1 Sélection du type de configuration

Il n'y a pas de différences significatives au niveau de l'efficacité de la coagulation entre les configurations monopolaire (MP) et bipolaire (BP) de la cellule d'électrocoagulation (Tableau 3.29). Cependant, les coûts énergétiques sont nettement plus élevés lorsque le traitement en configuration BP est appliqué. L'un des objectifs principaux du procédé étant d'offrir un traitement du lisier bovin à moindre coût, il a été convenu de conserver la configuration MP pour la suite des essais.

Tableau 3.29 Caractéristiques des fractions issues des essais d'électrocoagulation en configurations MP et BP (électrodes de fer, ST = 4,5%, $t_{élec}$ = 60 min, $t_{déc}$ = 120 min)

Paramètres	Contrôle			BP			MP		
	CONT – 1	CONT-2	CONT-3	DK-1	DK-2	DK-3	DK-4	DK-5	DK-6
Coût ($ m^{-3})	0,00	0,00	0,00	1,05	2,33	3,93	0,30	0,65	1,01
Intensité (A)	0	0	0	0,5	1	1,5	1	2	3
Fraction solide									
Volume décanté (mL)	0	0	0	0 ± 0	350 ± 21	300 ± 42	0 ± 0	0 ± 0	600 ± 70
ST (%)	3,0	3,5	4,0	2,0 ± 0,3	4,2 ± 0,4	3,2 ± 0,5	3,6 ± 0,4	2,2 ± 0,1	3,1 ± 0,3
Fraction liquide									
Volume surnageant (mL)	1000	1000	1000	20 ± 7	150 ± 14	150 ± 28	80 ± 21	150 ± 7	250 ± 14
MES (g L^{-1})	8,0	8,5	7,4	6,4 ± 0,6	3,8 ± 0,1	3,2 ± 0,1	12 ± 0	5,6 ± 0,4	6,2 ± 0,3
ST (%)	1,2	2,0	1,9	1,2 ± 0,1	1,3 ± 0,2	1,2 ± 0,4	1,0 ± 0,3	1,7 ± 0,6	1,5 ± 0,1

3.3.2 Optimisation de la concentration en ST

Lors de cette série d'essais, l'objectif était de déterminer la concentration en ST que devait présenter le lisier après l'étape de tamisage, afin de produire la meilleure coagulation. Les résultats de ces essais sont montrés au Tableau 3.30.

Les essais DK-13 et DK-14 présentent des valeurs intéressantes avec respectivement 2,4 ± 0,1 et 0,6 ± 0,2 g MES L^{-1}, ainsi que 0,3 ± 0,1 et 0,7 ± 0,3% ST. Compte tenu de la quantité d'eau nécessaire pour réaliser la dilution de la fraction liquide issue de l'étape de tamisage, il a été décidé de fixer une concentration cible comprise entre 1,8 et 2,0% ST pour la fraction liquide qui subira un traitement par le procédé d'électrocoagulation. L'économie d'eau (même si elle sera recyclée au cours du procédé final) est un aspect important du projet en cours. Ainsi, la concentration maximale à l'issue de l'étape de tamisage étant autour de 4% ST, le volume d'eau de dilution requis ne sera jamais supérieur au volume de lisier à diluer, pour un volume fixe (donné) de lisier (dilution 1/2).

Tableau 3.30 **Caractéristiques des fractions issues des essais d'électrocoagulation visant à déterminer la concentration optimale de ST (électrodes de fer, mode MP, I = 3 A, $t_{élec}$ = 60 min, $t_{déc}$ = 120 min)**

Paramètres	CONT-11	DK-11	CONT-12	DK-12	CONT-13	DK-13	CONT-14	DK-14
ST (%)	3,9		3,2		1,9		1,6	
Coût ($ m^{-3})	0,00	0,99	0,00	0,98	0,00	0,97	0,00	1,01
Fraction solide								
Volume décanté (mL)	0	0 ± 0	0	0 ± 0	500	300 ± 21	250	150 ± 30
ST (%)	4,4	3,7 ± 0,4	4,2	3,4 ± 0,1	4,8	3,2 ± 0,4	5,4	3,1 ± 0,1
Fraction liquide								
Volume surnageant (mL)	0	700 ± 35	0	500 ± 28	0	400 ± 7	0	300 ± 29
MES (g L^{-1})	5,2	25,3 ± 0,6	19,4	15,7 ± 0,7	8,2	2,4 ± 0,1	5,9	0,6 ± 0,2
ST (%)	3,8	1,8 ± 0,1	2,8	2,2 ± 0,3	1,6	0,7 ± 0,3	1,0	0,3 ± 0,1
Nombre d'essais (*n*)	1	2	1	2	1	2	1	2

3.3.3 Optimisation de l'intensité du courant électrique

L'intensité du courant appliquée au cours du procédé d'électrocoagulation est un critère déterminant de l'efficacité de la technologie. La coagulation s'améliore avec l'augmentation de l'intensité du courant (Tableau 3.31, Figure 3.7).

Le coût du procédé, lié à la quantité d'électricité et de métaux mis en solution, augmente avec l'intensité du courant. Il semble donc pertinent de se limiter à une intensité comprise entre 3 et 4 A, bien que cela semble encore onéreux (0,99 à 1,48 $ m^{-3}). Lors de l'évaluation des coûts reliés à l'exploitation de cette technologie, le prix du métal est basé et actualisé en fonction du marché mondial des métaux (London Metal Exchange, 2012).

Tableau 3.31 **Caractéristiques des fractions issues des essais d'électrocoagulation visant à déterminer l'intensité optimale du courant électrique (électrodes de fer, mode MP, ST = 1,7%, $t_{élec}$ = 60 min, $t_{déc}$ = 120 min)**

Paramètres	CONT-15	DK-15	DK-16	DK-17	DK-18	DK-19
Intensité imposée (A)	0	1,0	2,0	3,0	4,0	6,0
Coût ($ m^{-3})	0,00	0,29	0,62	0,99	1,48	3,05
Fraction solide						
Volume décanté (mL)	250	0 ± 0	80 ± 14	100 ± 7	100 ± 28	200 ± 14
ST (%)	6	4,5 ± 0,1	3,2 ± 0,3	3,4 ± 0,6	3,1 ± 0,1	4,5 ± 0,7
Fraction liquide						
Volume surnageant (mL)	0	300 ± 30	500 ± 70	500 ± 7	500 ± 141	400 ± 42
MES (g L^{-1})	5	6,4 ± 0,3	0,2 ± 0,1	0,1 ± 0,2	0,2 ± 0,1	0,1 ± 0,1
Nombre d'essais (*n*)	1	2	2	2	2	2

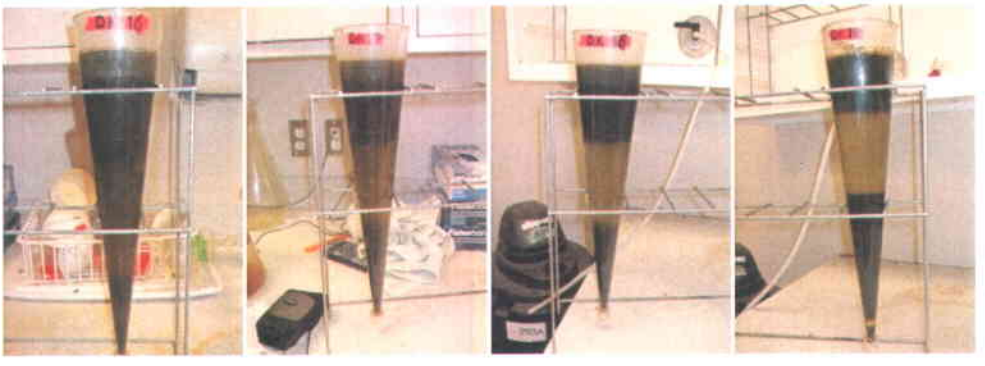

Figure 3.7 **Photographies des lisiers après décantation lors des essais DK-16 à DK-19**

3.3.4 Optimisation de la durée de l'électrocoagulation

Le temps de traitement est un critère d'évaluation important pour une technologie de traitement du lisier. Dans un procédé comme l'électrocoagulation, le temps influence l'efficacité (quantité de coagulants en solution), mais aussi le coût de la technologie (consommation d'électricité et

dissolution des métaux). Le Tableau 3.32 présente les résultats des essais visant à établir un temps optimal pour l'électrocoagulation.

Tableau 3.32 Caractéristiques des fractions issues des essais d'électrocoagulation visant à déterminer la durée optimale de l'électrocoagulation (électrodes de fer, mode MP, ST = 1,5%, I = 3 A, $t_{déc}$ = 120 min)

Paramètres	CONT-20	DK-20	DK-21	DK-22	DK-23
Durée (min)	0	60	45	30	15
Coût ($ m^{-3})	0,00	0,97	0,72	0,47	0,24
Fraction solide					
Volume décanté (mL)	250	130 ± 21	120 ± 7	150 ± 14	0 ± 0
ST (%)	4,1	3,2 ± 0,3	3,2 ± 0,1	2,8 ± 0,2	4,6 ± 0,1
Fraction liquide					
Volume surnageant (mL)	0	500 ± 28	600 ± 14	500 ± 28	0 ± 0
MES (g L^{-1})	6,0	0,3 ± 0,1	0,1 ± 0,1	0,7 ± 0,3	4,0 ± 1,4
ST (%)	1,1	0,5 ± 0,1	0,2 ± 0,1	0,5 ± 0,1	1,0 ± 0,1
Nombre d'essais (*n*)	1	2	2	2	2

Les essais DK -21 et DK-22 présentent des résultats avantageux en termes de coût et d'efficacité avec des coûts de respectivement 0,72 et 0,47 $ m^{-3}. Après 30 min de traitement, une fraction liquide avec 0,5 ± 0,1% ST et 0,7 ± 0,3 g MES L^{-1} a été obtenue (DK-22). Toujours par souci d'économie, mais aussi dans l'objectif de réduire la durée du traitement, un temps de traitement compris entre de 30 et 45 min a été retenu pour la suite des essais.

Afin de réduire la durée de traitement et les coûts, la possibilité d'utiliser un courant à forte intensité pendant de courtes périodes, inférieures ou égales à 30 min, a été explorée. Les résultats obtenus au cours de ces essais sont indiqués au Tableau 3.33.

Tableau 3.33 Caractéristiques des fractions issues des essais d'électrocoagulation à forte intensité imposée (électrodes de fer, mode MP, ST = 2,2%, $t_{déc}$ = 120 min)

Paramètres	CONT-31	DK-31	DK-37	DK-33	DK-34	DK-35	DK-36
Intensité imposée (A)	0	4,0	4,0	6,0	6,0	6,0	6,0
Durée ($t_{élec}$) (min)	0	30	20	30	20	15	10
Coût ($ m^{-3})	0,00	0,68	0,46	1,21	0,74	0,58	0,38
Fraction solide							
Volume décanté (mL)	0	450 ± 35	0 ± 0	180 ± 30	200 ± 14	0 ± 0	0 ± 0
ST (%)	6,0	3,7 ± 0,1	6,0 ± 0,7	3,5 ± 0,1	3,6 ± 0,1	2,5 ± 0,3	3,6 ± 0,1
Fraction liquide							
Volume surnageant (mL)	0	400 ± 70	0 ± 0	600 ± 14	600 ± 7	0 ± 0	0 ± 0
MES (g L^{-1})	5,5	0,3 ± 0,1	8,7 ± 0,4	0,4 ± 0,1	1,3 ± 0,1	9,3 ± 0,3	8,7 ± 0,1
ST (%)	1,3	0,6 ± 0,2	1,6 ± 0,1	0,3 ± 0,1	0,5 ± 0,1	1,3 ± 0,1	1,5 ± 0,1
Nombre d'essais (*n*)	1	2	2	2	2	2	2

Les essais DK-31 et DK-34 offrent de bons rapports coût/efficacité. Ils ont permis d'obtenir une fraction liquide allégée en ST et MES. L'essai DK-31 (4 A pendant 30 min) présente un volume de matière décantée de 450 ± 35 mL avec 3,7 ± 0,1% ST. Ce résultat est plus intéressant que l'essai DK-34 (6 A pendant 20 min) au regard des objectifs financiers visés et en terme d'efficacité de traitement (qualité du liquide résiduel). Ces paramètres opératoires ont donc été retenus pour l'électrocoagulation d'une fraction liquide de lisier bovin à une concentration autour de 2,0% ST.

3.3.5 Optimisation de la durée de la décantation

Lors de cette série d'essais, l'objectif ciblé était d'identifier le temps de décantation optimal. Dans le cas où la séparation S/L post-électrocoagulation devait se réaliser par décantation, il convenait de fixer un temps de décantation assez court pour permettre une séparation S/L efficace. Il a été constaté au cours de cette série d'essais qu'un temps de décantation de 1 h

offrait une séparation convenable (en cône de décantation de 1 L). En effet, au-delà d'une heure de décantation dans les conditions expérimentales testées, aucune différence significative n'a été observée entre les fractions issues d'une décantation de 60 min et celles issues d'une décantation plus longue (le maximum fixé était de 2 h) (Tableau 3.34).

Tableau 3.34 Caractéristiques des fractions issues des essais d'électrocoagulation visant à déterminer la durée optimale de la décantation (électrodes de fer, mode MP, ST = 1,6%, I = 3A, $t_{élec}$ = 60 min)

Paramètres	CONT-24	DK-24	CONT-25	DK-25	CONT-26	DK-26
Durée ($t_{déc}$) (min)	120	120	90	90	60	60
Coût ($ m^{-3})	0,00	0,79	0,00	0,77	0,00	0,78
Fraction solide						
Volume décanté (mL)	250	120 ± 14	250	160 ± 28	300	110 ± 3
ST (%)	4,9	3,6 ± 0,4	2,9	3,5 ± 0,1	6,9	3,4 ± 0,1
Fraction liquide						
Volume surnageant (mL)	0	600 ± 21	0	500 ± 1	0	700 ± 30
MES (g L^{-1})	5,4	0,6 ± 0,1	5,7	0,6 ± 0,1	6,2	0,6 ± 0,1
ST (%)	1,0	0,5 ± 0,0	1,2	0,5 ± 0,1	1,0	0,4 ± 0,0
Nombre d'essais (*n*)	1	2	1	2	1	2

Au cours de la série d'essais précédents, qui a servi à établir les paramètres de l'électrocoagulation, la décantation en cône a été utilisée pour réaliser la séparation entre les fractions solide (flocs) et liquide. Une fois la séparation S/L complétée en cône (après décantation), il a été quasiment impossible de récupérer les fractions entières et séparément sans en altéré la clarté (pour le liquide) ou la siccité (pour le solide). Des petites portions ont pu être prélevées pour l'évaluation des ST et des MES.

Tableau 3.35 Caractéristiques des fractions issues de la séparation S/L à partir de 1 L de lisier bovin brut utilisant l'électrocoagulation du lisier tamisé dilué suivie d'une décantation

Fraction	Poids sec (g)	Solides enlevés (%)	P_{tot} (g)	N-NTK (g)	$N\text{-}NH_4$ (g)	Coûts ($\$ m^{-3}$)
Lisier brut	69		0,04	0,22	0,085	
Tamis (3 mm)	39		0,024	0,13	0,037	
Tamis (0,5 mm)	10		0,0057	0,031	0,011	
Liquide tamisé	19	71%	0,01	0,060	0,023	
Lisier tamisé dilué	13		0,002	0,015	0,003	
Décanté	16,6		0,0083	0,038	0,0065	
Liquide final	3,6	77% *	0,0006	0,0046	0,0018	3,08

* Pourcentage de solides retirés à partir du liquide tamisé dilué.

L'électrocoagulation permet de concentrer 77% des solides à partir du liquide issus de l'étape de pré-tamisage, puis dilué à 2,0% ST. Le procédé, incluant l'étape de pré-tamisage, a permis de concentrer 98% du P_{tot} et du N-NTK et d'obtenir un liquide final ayant une concentration de 3,6 g MES L^{-1} (Tableau 3.35) ce qui rejoint les objectifs de traitement. Il faut se rappeler que le mode de séparation S/L qui convient le mieux actuellement pour le lisier traité par électrocoagulation est la décantation.

Au regard des résultats, des paramètres expérimentaux ont été retenus pour la séparation S/L du lisier bovin pré-tamisé et dilué et ensuite traité par électrocoagulation. Bien que ces paramètres ne correspondent pas forcément aux paramètres ayant offert les meilleurs résultats expérimentaux, ils tiennent compte des objectifs visés pour l'élaboration du procédé qui tiennent compte des coûts, de l'économie d'eau, de manipulations et de temps.

Les conditions opératoires retenues sont les suivantes:

- Configuration: MP
- Solides totaux du lisier pré-tamisé et dilué: 2,0%
- Intensité du courant appliqué: 4 A
- Durée de l'électrocoagulation: 30 min
- Durée de décantation: 60 min

3.3.6 Électrocoagulation du lisier bovin à l'échelle pré-industrielle

Considérant les difficultés rencontrées lors des tentatives de séparation S/L en fin de procédé, la séparation S/L a été réalisée à l'aide d'un tamis ayant un maillage de 0,5 mm pour la série d'essais suivants. La durée de traitement devant être la plus courte possible, il est préférable de miser sur le tamisage qui permet une séparation plus rapide que la décantation.

Tableau 3.36 Caractéristiques des fractions issues des essais complémentaires sur l'électrocoagulation (électrodes de fer, mode MP, ST = 2,0%, I = 53,7 A, $t_{élec}$ = 60 min)

Paramètres	DK-121	DK-122	DK-123	Moyenne	Écart type
Durée ($t_{déc}$) (h)	12	12	12	12	0
Coût ($ m^{-3})	1,62	1,58	1,57	1,59	0,03
Fraction solide surnageant					
Masse (g)	3075	2815	2903	2931	132
ST (%)	4,9	3,6	2,9	3,8	1,0
Fraction liquide					
MES (g L^{-1})	5,4	5,5	5,0	5,3	0,3
ST (%)	1,0	1,4	1,2	1,2	0,2

Suite aux essais d'électrocoagulation d'un volume de lisier tamisé de 25 L, il a été constaté que la majorité des solides coagulés formaient un amas en forme de mousse (Figure 3.8). Pour un volume de 25 L de lisier pré-tamisé, en moyenne 5 L de mousse était produite. Après récupération de la majorité du surnageant (mousse) et après tamisage du lisier pré-tamisé coagulé, les solides récupérés (mousse et solides sur tamis) présentaient une concentration de 3,8 ± 1,0% ST (Tableau 3.36). Il a été techniquement difficile de réaliser la séparation des solides coagulés pour deux raisons principales. Premièrement, lors de la récupération du surnageant, une partie de ce dernier se décomposait et se retrouvait en solution dans la portion liquide. Deuxièmement, après cette étape de récupération du liquide, la faible quantité de solide récupérée sur le tamis (0,5 mm de maillage) était formée de flocs fragiles qui se défaisaient au contact de la spatule utilisée pour la récupération des solides (Figure 3.9). Des essais ont été menés en utilisant des tamis ayant un maillage inférieur à 0,5 mm (soit 450 µm et 250 µm). Les résultats n'étaient pas concluants car le passage du mélange coagulé était plus difficile et donc plus long sans amélioration de la qualité du liquide finale.

La portion liquide, quant à elle, présente une concentration de 5,2 ± 0,2 g MES L^{-1}. Le liquide utilisé pour l'évaluation des paramètres de performance a été prélevé minutieusement avant la récupération des solides, à l'aide d'un tuyau et d'une pompe, entre la fraction surnageant et la fraction décantée, en prenant soin de ne pas remuer les fractions solides.

Figure 3.8 **A: Montage après électrocoagulation; B: Mousse; C et D: Solide issu de l'électrocoagulation et séparé sur tamis**

Les résultats obtenus suites aux essais utilisant l'électrocoagulation comme procédé de séparation S/L d'un volume de 25 L lisier bovin pré-tamisé démontrent que la technologie est fonctionnelle, car elle permet de concentrer les solides en mousses et en flocs. Concernant l'ensemble des tests sur l'électrocoagulation d'un lisier de bovin pré-tamisé et dilué, il est nécessaire d'approfondir la recherche sur le processus de formation des flocs, mais aussi sur la manière de séparer les solides coagulés du liquide final. La formation des flocs et la concentration des nutriments en fractions qualifiées de solides ont été observés et démontrées. Le liquide final qui est prélevé minutieusement en cône à l'aide d'une pipette, lors des tests réalisés en petite cellule électrolytique au laboratoire, présente des concentrations en MES très intéressantes au regard des objectifs de traitement (0,6 – 2,4 g MES L^{-1}). Cependant, la

récupération des fractions solides altère la qualité du liquide finale lors des tentatives de séparation des fractions solides et liquides. Les fractions solides finales obtenues, en plus de présenter une faible concentration en ST (6% ST étant le maximum atteint au cours des essais), ont la particularité d'être fragile et de se décomposer lors des tentatives de séparation. Il serait pertinent d'explorer la possibilité d'ajouter une étape de traitement post électrocoagulation, qui assurerait un renforcement mécanique des flocs et assurerait la résistance de ces derniers lors des étapes de séparation subséquentes.

La comparaison entre les flocs produits lors de l'utilisation des PAM et ceux issus de l'électrocoagulation montre une très nette différence. Après le passage du liquide, le tamis est agité manuellement dans un mouvement rotatif qui permet de laisser passer le liquide résiduel et d'agglutiner les flocs. Les flocs issus de la floculation à l'aide des PAMs s'agglutinent sur le tamis formant une boule de flocs compact et indissociables lors de l'agitation du tamis (Figure 3.9). Cette étape finale de séparation est primordiale et précède les analyses faites sur le liquide final issu de la séparation utilisant les PAMs. Il n'en est pas de même pour les flocs issus de l'électrocoagulation. Ces derniers restent étalés sur le tamis (Figure 3.9) sous forme de flocs qui se désagrègent lors du mouvement rotatif du tamis nécessaire au retrait du liquide excédentaire.

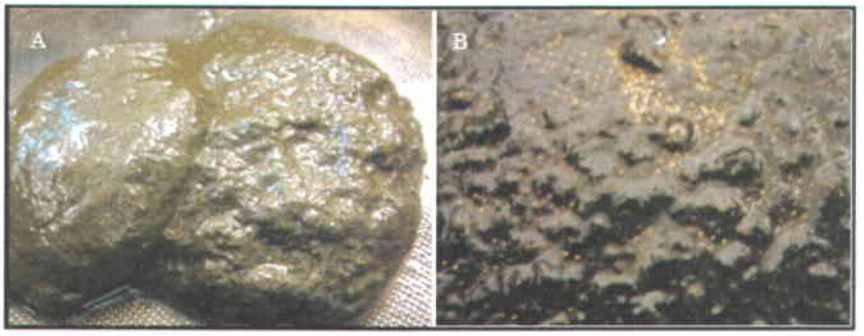

Figure 3.9 **Photographies des flocs A: issus de la floculation à l'aide des PAM; B: issus de l'électrocoagulation**

Lorsqu'ils se désagrègent, ces flocs se resolubilisent dans le liquide final engendrant une augmentation des particules solides et donc des concentrations finales de ST, MES, P_{tot} et N-NTK. Les solides finaux issus de la filière utilisant les PAMs présentent des concentrations de 9,3 ± 2,3% ST, ce qui est favorable aux objectifs du procédé car en 24-48 h de séchage ces concentrations peuvent atteindre les 11% ST visés (Tableau 3.28) qui permettent le transport en camion benne. De plus, le fait que ces flocs s'agglutinent en masse compact favorise la séparation, mais aussi les manipulations post-traitement incluant le pelletage, le passage dans un tambour rotatif ou tout autre mode de transfert de ces résidus.

Les résidus solides issus de l'électrocoagulation offrent, quant à eux, une concentration comprise entre 3,0 et 6,0% ST. En plus d'être difficilement malléables, ces derniers représentent un défi post traitement supplémentaire en comparaison à ceux issus des PAMs, car il faudra plus de moyens techniques pour assurer leur intégrité et celle du liquide final au cours de la séparation S/L, mais aussi pour réaliser l'augmentation de leur concentration en ST après séparation.

L'étude technico-économique de la filière électrocoagulation n'a pas été approfondie. Les essais jugés optimaux présentent un coût de 3,00 $ m^{-3} de lisier traité avec la technologie utilisant l'électrocoagulation. Ce montant ne tient compte que de la consommation de métal mis en solution et du coût en électricité. Ce montant a été établi à partir du prix de l'acier doux sur le marché au moment des essais, soit en 2008. S'il fallait poursuivre l'analyse technico-économique de cette technologie, il faudrait tenir compte du prix actuel de l'acier doux qui a considérablement augmenté en 4 ans, passant de 228 $ t^{-1} en 2008 à près de 400 $ t^{-1} en 2012 et il faudrait tenir compte de tous les autres paramètres économiques. Les deux filières à l'étude ayant beaucoup de similarités au niveau opératoire (Figures 4.1 et 4.2), la filière électrocoagulation serait plus coûteuse car en plus de nécessiter plus de coagulant elle comporte une étape supplémentaire de traitement.

3.4 Analyse technico-économique de la filière utilisant les PAMs

3.4.1 Schéma du procédé

La mise au point d'une filière de traitement, incluant le traitement des résidus de l'industrie agro-alimentaire, nécessite l'étude approfondie de tous les paramètres techniques qui influencent l'aspect financier du procédé. Les coûts d'exploitation doivent être analysés en fonction des critères de chaque technologie employée.

L'étude technico-économique d'un procédé de traitement commence par la mise au point d'un schéma complet de procédé, comprenant toutes les étapes qu'il comporte. Les intrants constitués de l'effluent à traiter, de l'eau de procédé, des produits utilisés, etc., et les extrants, constitués des fractions issues de chaque étape du procédé, doivent être identifiés.

La Figure 3.10 présente le schéma du procédé avec les données expérimentales pour un essai typique réalisé au laboratoire, utilisant le pré-tamisage suivit de la floculation à l'aide de PAM pour la séparation S/L du lisier bovin.

La Figure 3.11 présente le schéma réalisé pour l'étude technico économique. Sur ce dernier, chaque étape a été nommée (TAM1, TAM2, POL1, RES2 ...) pour permettre de les intégrer dans le model de calcul, mais aussi pour identifier ces étapes dans les tableaux de bilan massique.

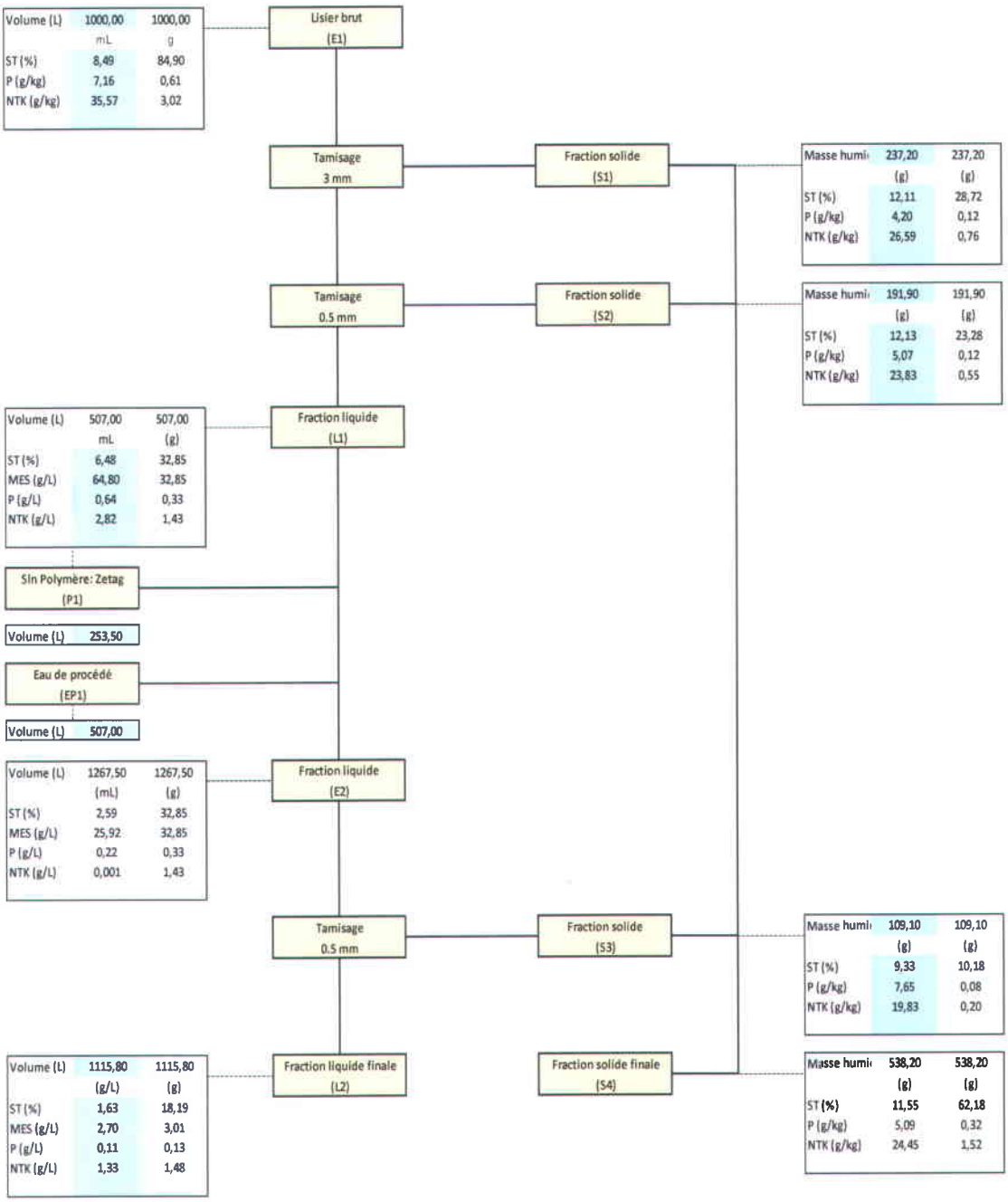

Figure 3.10 **Schéma du procédé de séparation S/L de lisier bovin utilisant les PAMs comme floculant incluant les données expérimentales**

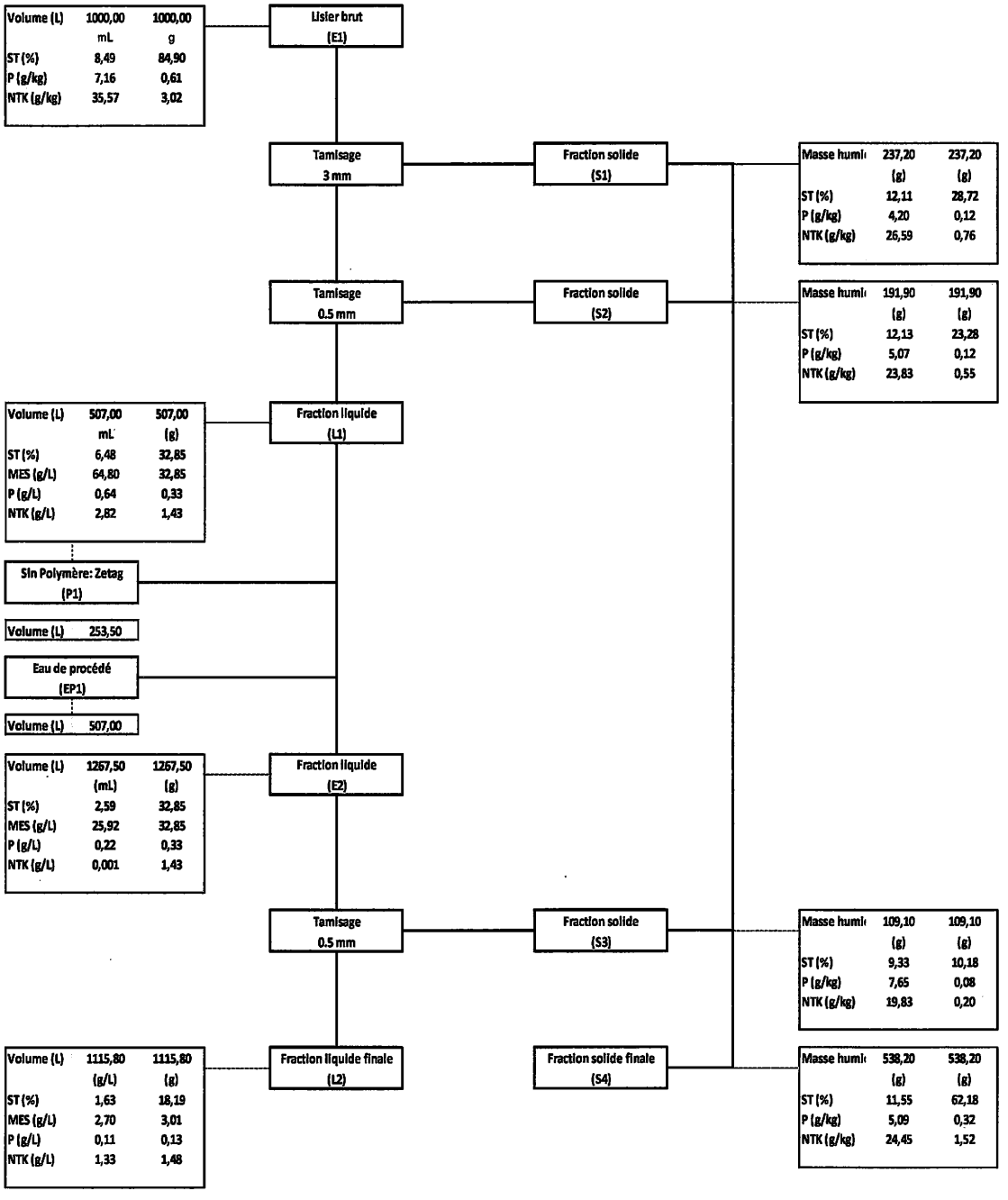

Figure 3.10 **Schéma du procédé de séparation S/L de lisier bovin utilisant les PAMs comme floculant incluant les données expérimentales**

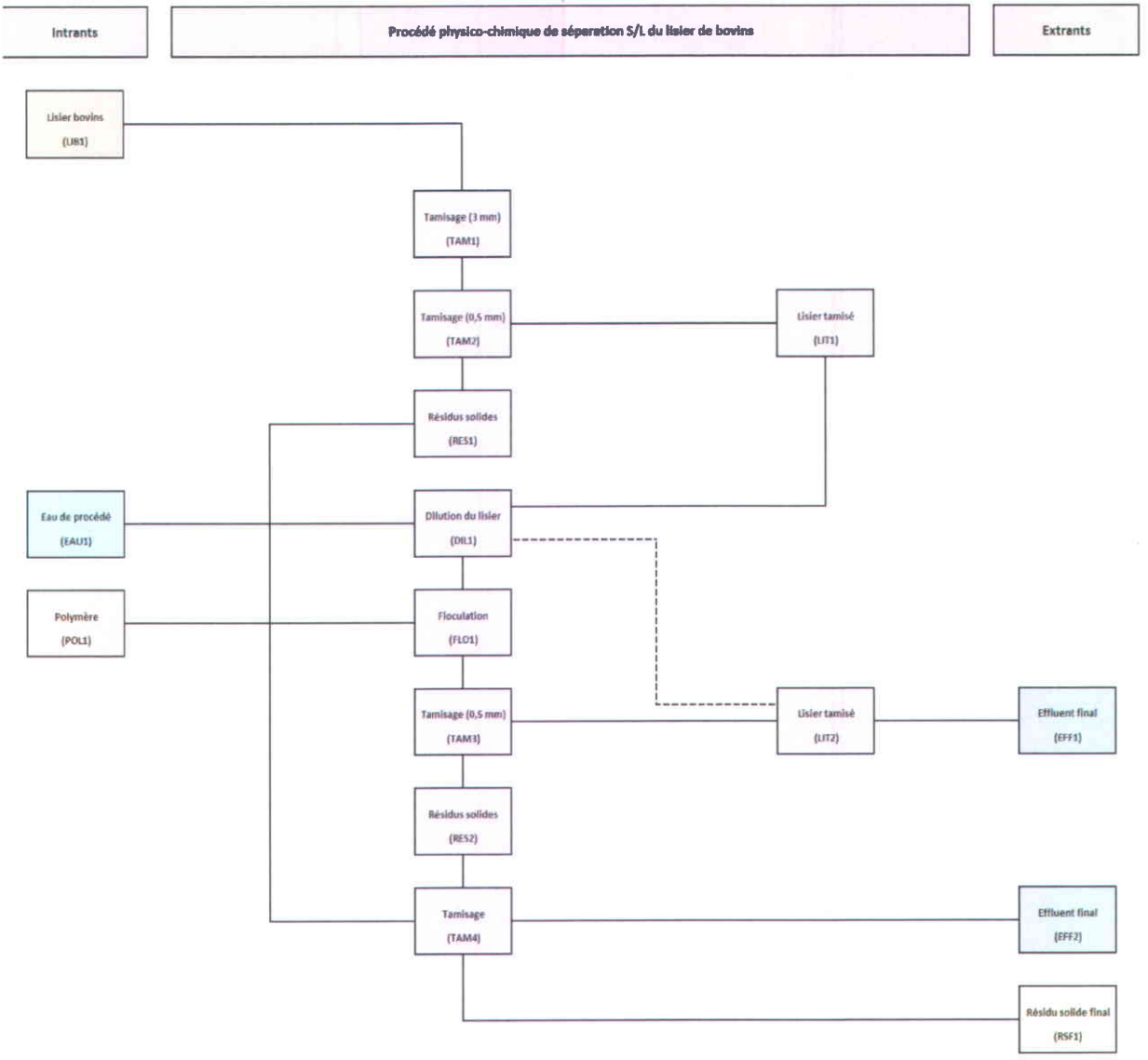

Figure 3.11 **Schéma pour l'étude technico économique du procédé de séparation S/L de lisier bovin utilisant les PAMs comme floculant**

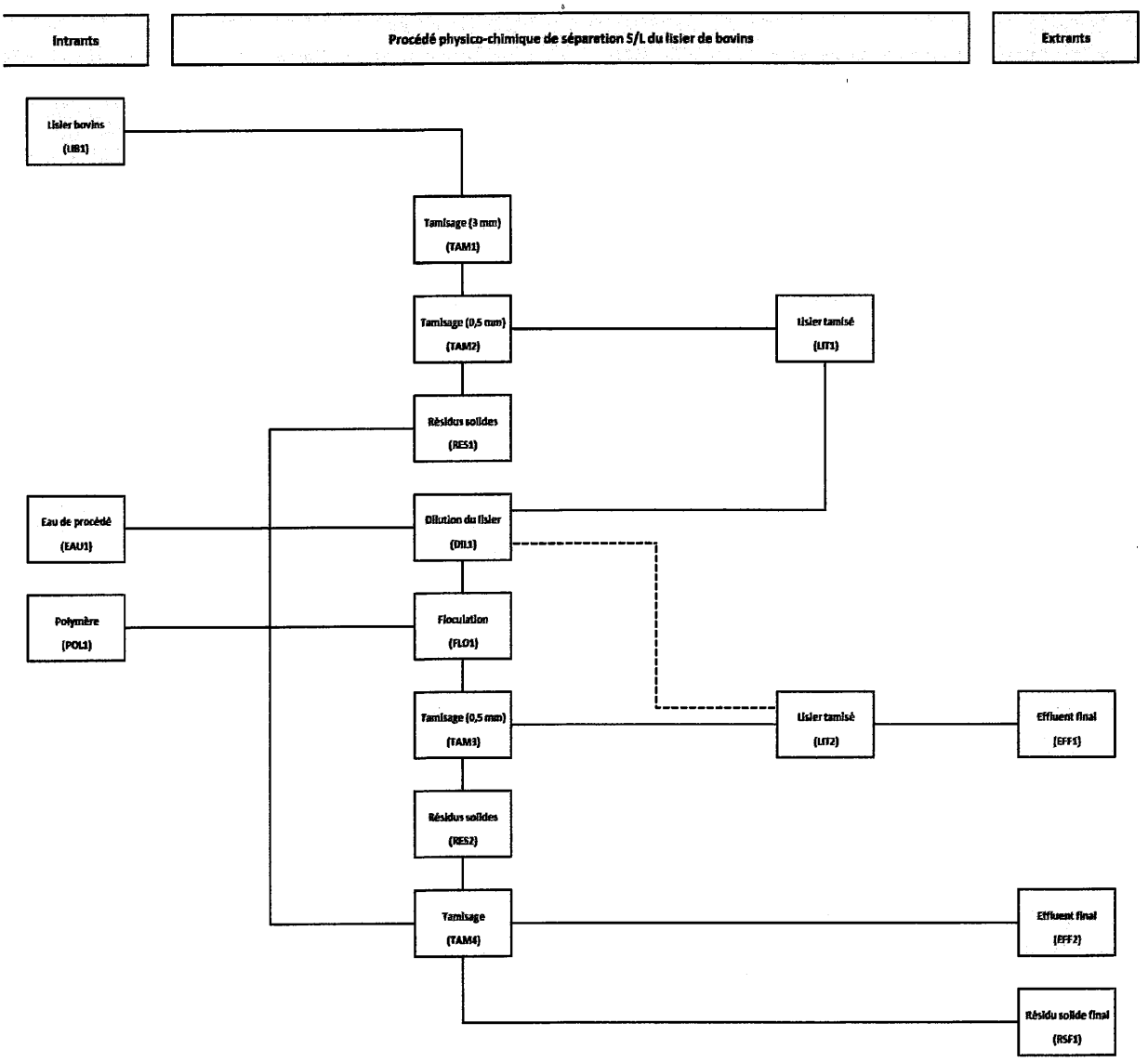

Figure 3.11 **Schéma pour l'étude technico économique du procédé de séparation S/L de lisier bovin utilisant les PAMs comme floculant**

3.4.2 Bilan massique

L'objectif visé par cette démarche est d'établir un bilan des volumes, des masses humides et des poids secs de tous les intrants et extrants. Le bilan massique présenté au Tableau 3.37 affiche les caractéristiques pour chaque intrant et extrant de chacune des étapes du procédé. Il est obtenu à partir du model réalisé sur la base des résultats expérimentaux obtenus lors des essais de reproductibilité sur la filière utilisant les PAMs au laboratoire. Les étapes sont nommées et possèdent chacune un code qui correspond à la position de l'étape sur le schéma de la Figure 3.11. Elle fournit de l'information supplémentaire sur l'efficacité de la filière en évaluant les pertes éventuelles de matière au cours du procédé. Le bilan massique présente un rapport intrant sur extrant de 100% en termes de volume, masse humides et poids sec. Un écart maximum de ± 15% est généralement toléré lors de la mise au point de ce type de procédé.

Tableau 3.37 Bilan massique établi pour l'analyse technico-économique de la filière utilisant les PAMs

Étapes	Code	Volume (L)	Masse humide (kg)	Poids sec (kg)	Solides totaux (% p/p)	Densité (kg L^{-1})
Lisier bovins	LIB1	1000,00	1100,00	94,27	8,57	1,100
Tamisage (3 mm)	TAM1	1000,00	1100,00	94,27	8,57	1,100
Tamisage (0,5 mm)	TAM2	1000,00	1100,00	94,27	8,57	1,100
Résidus solides	RES1	245,00	294,00	34,19	11,63	1,200
Lisier tamisé	LIT1	755,00	806,00	60,08	7,45	1,068
Dilution du lisier tamisé	DIL1	1510,00	1636,50	62,43	3,81	1,084
Eau de procédé	EAU1	0,00	0,00	0,00	0,00	1,000
Lisier tamisé recirculé	LIT2	755,00	830,50	2,35	0,28	1,100
Floculation du lisier	FLO1	1540,20	1666,73	62,46	3,75	1,082
Polymère	POL1	30,20	30,23	0,03	0,50	1,001
Tamisage (0,5 mm)	TAM3	1540,20	1666,73	62,46	3,75	1,082
Résidus solides	RES2	331,14	397,37	36,96	9,30	1,200
Lisier tamisé	LIT2	1209,06	1269,36	25,50	2,01	1,050
Effluent final	EFF1	454,06	438,86	23,15	0,05	0,967
Tamisage final	TAM4	576,14	691,37	71,15	10,29	1,200
Résidu solide final	RSF1	115,23	126,75	25,35	20,00	1,100
Total-Effluent final	EFF2	460,91	564,62	45,80	0,08	1,225
Bilan de masse						
Intrants		1030,20	1130,23	94,30		
Extrants		1030,20	1130,23	94,30		
E/I (%)		100,00	100,00	100,00		

3.4.3 Coûts et revenus totaux d'exploitation du procédé

Le Tableau 3.38 présente la synthèse des paramètres de base et des coûts reliés à l'exploitation du procédé de séparation S/L du lisier bovin utilisant les PAMs comme floculant. En tenant compte de tous les paramètres disponibles, le modèle prédit un coût d'exploitation de 12,41 \$ m^{-3} de lisier brut traité avec une capacité de traitement de 200 m^3 jr^{-1}. Le traitement inclus une étape de pré-tamisage en séquence (3 mm puis 0,5 mm), une dilution du lisier tamisé, une floculation à l'aide d'un polymère de polyacrylamide (à 1 g L^{-1}, 2% v/v), un tamisage (0,5 mm) puis une

concentration mécanique des résidus solides à l'aide d'un tambour rotatif. Ce montant ne contient pas les revenus liés à une exploitation commerciale du procédé.

3.4.4 Analyse de flux monétaire

La profitabilité du procédé à l'étude est évaluée sur une période de 10 ans. Le Tableau 3.39 présente les données concernant l'analyse de flux monétaire qui ont été appliqués au procédé. Les paramètres contenus dans l'analyse de flux tiennent compte de tous les facteurs susceptibles d'influencer la variation des coûts. Une projection permet d'estimer certaines variations telles que l'inflation pour les prochaines années. Ainsi, sur une période de 10 ans totalisant 3 500 jours d'opération, un centre de traitement exploitant la filière à l'étude permettrait de traiter 630 000 t de lisier brut issu de l'élevage bovin (soit 63 000 t an^{-1}).

Tableau 3.38 Coûts et revenus totaux d'exploitation du procédé

Paramètres				Coûts ($ m^{-3} lisier)	Coûts ($Can an^{-1})
Paramètres d'exploitation de base					
Période d'opération	350	jrs an^{-1}			
Capacité de traitement de l'usine	200	m^3 jr^{-1}			
Nombre d'heures d'opération par jour	24	h jr^{-1}			
Facteur d'efficacité d'opération	90	%			
Capacité annuelle	63000	m^3 an^{-1}			
Paramètres de marché					
Taux d'inflation annuel	2,0	% an^{-1}			
Taux d'intérêt annuel	5,0	% an^{-1}			
Taux d'escompte annuel	6,0	% an^{-1}			
Taux d'imposition sur le revenu	30,0	% sur les revenus bruts			
Taux d'échange	1,0	$US $Can^{-1}			
Marshall and Swift Equipment Cost Index	1490,2	1th Q - 2011			
Investissement					
	Période d'amortissement	10	Années		
	Durée de vie des équipements	10	Années		
	Fonds de roulement	15	% coûts fixes en capitaux		
	Total des coûts fixes en capitaux	837 921	$Can		
	Fonds de roulement	125 688	$Can		
	Investissement total	963 609	$Can		
Coûts directs d'opération					
A. Matériaux bruts (produits chimiques)	Consommation (kg m^{-3})	Coût unitaire ($Can kg^{-1})			
Polymère	0,030	7,000		(0,21) $	(13 318) $
B. Main-d'œuvre d'opération					
	Coût unitaire	25,0	$Can h^{-1}		
	Supervision	15,0	% M.O. opération		
	Heures d'opération (h m^{-3})				
1. Opération	0,10			(2,43) $	(153 090) $
2. Supervision	0,01			(0,36) $	(22 964) $
C. Utilités					
1. Électricité	Coût unitaire de l'électricité	0,050	$Can kWh^{-1}		
	Consommation électrique	1,84	kWh m^{-3}	(0,09) $	(5 803) $
2. Eau de procédé	Coût unitaire de l'eau de procédé	0,05	$Can m^{-3}		
	Consommation eau de procédé	0,00	m^3 eau m^{-3} de lisier	- $	- $
3. Carburants	Coût unitaire du gaz naturel	14,00	$Can MBtu^{-1}		
	Consommation de gaz naturel	0,00	MBtu m^{-3}	- $	- $
4. Gestion des déchets et produits	Qté produite (t m^{-3})	Coût unitaire ($Can t^{-1})			
Transport et disposition de déchets réguliers	0,127	20		(2,54) $	(159 707) $
Transport et disposition de déchets spéciaux	0,000	90		- $	- $
Transport et disposition de déchets dangereux	0,000	300		- $	- $
D. Entretien et réparation	% coûts fixes en cap. an^{-1}	2,0		(0,27) $	(16 758) $
E. Matériaux courants	% coûts fixes en cap. an^{-1}	0,5		(0,07) $	(4 190) $
F. Frais de laboratoire	% M.O. opération	10,0		(0,24) $	(15 309) $
G. Brevets et redevances	$Can m^{-3}	1,0		(1,00) $	(63 000) $
Sous-total				**(7,21) $**	**(454 139) $**
Coûts indirects et généraux					
Dépenses administration	% M.O. opération et supervision	15		(0,42) $	(26 408) $
Avantages sociaux et marginaux	% M.O. opération et supervision	22		(0,61) $	(38 732) $
Frais généraux	% M.O. opération et supervision	30		(0,84) $	(52 816) $
Assurances et taxes	% coûts fixes en capitaux an^{-1}	3,0		(0,40) $	(25 138) $
Marketing et ventes	% coûts totaux	2,0		(0,18) $	(11 170) $
Recherche et développement	% coûts totaux	3,0		(0,27) $	(16 755) $
Amortissement				(1,53) $	(96 361) $
Financement (remboursement des intérêts)				(0,96) $	(60 601) $
Sous-total				**(5,21) $**	**(327 980) $**
Bilan d'exploitation du procédé				**(12,41) $**	**(782 119) $**

Tableau 3.39 Analyse de flux monétaire

Années		Total	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Nombre de jours d'opération (FJOA)	(jrs an^{-1})	3 500	350	350	350	350	350	350	350	350	350	350
Volume quotidien traité (FCAJ)	(m^3 jr^{-1})	2 000	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
Volume annuel traité (CAPA)	(m^3 an^{-1})	630 000	63 000	63 000	63 000	63 000	63 000	63 000	63 000	63 000	63 000	63 000
Volume cumulatif traité (CACT)	(m^3)		63 000	126 000	189 000	252 000	315 000	378 000	441 000	504 000	567 000	630 000
Revenus d'exploitation												
Revenus de traitement (REEX)	($Can an^{-1})	13 796 648	1 260 000	1 285 200	1 310 904	1 337 122	1 363 865	1 391 142	1 418 965	1 447 344	1 476 291	1 505 817
Revenus totaux	**($Can an^{-1})**	**13 796 648**	**1 260 000**	**1 285 200**	**1 310 904**	**1 337 122**	**1 363 865**	**1 391 142**	**1 418 965**	**1 447 344**	**1 476 291**	**1 505 817**
Coûts d'opération												
Coûts directs (CADO)	($Can an^{-1})	(4 972 695)	(454 139)	(463 222)	(472 486)	(481 936)	(491 575)	(501 406)	(511 434)	(521 663)	(532 096)	(542 738)
Coûts indirects et généraux (CAIO)	($Can an^{-1})	(1 872 605)	(171 019)	(174 439)	(177 928)	(181 486)	(185 116)	(188 818)	(192 595)	(196 447)	(200 375)	(204 383)
Coûts de financement (CAFI)	($Can an^{-1})	(606 008)	(60 601)	(60 601)	(60 601)	(60 601)	(60 601)	(60 601)	(60 601)	(60 601)	(60 601)	(60 601)
Amortissement (CAAM)	($Can an^{-1})	(963 609)	(96 361)	(96 361)	(96 361)	(96 361)	(96 361)	(96 361)	(96 361)	(96 361)	(96 36)	(96 361)
Coûts totaux d'opération (CTOP)	**($Can an^{-1})**	**(8 414 918)**	**(782 119)**	**(794 622)**	**(807 376)**	**(820 384)**	**(833 652)**	**(847 186)**	**(860 991)**	**(875 071)**	**(889 433)**	**(904 083)**
Revenus bruts avant imposition (RBAI)	**($Can an^{-1})**	**5 381 731**	**477 881**	**490 578**	**503 528**	**516 738**	**530 212**	**543 956**	**557 974**	**572 273**	**586 857**	**601 734**
Imposition	($Can an^{-1})											
Impôt sur le revenu (IMRE)	($Can an^{-1})	(1 614 519)	(143 364)	(147 173)	(151 059)	(155 021)	(159 064)	(163 187)	(167 392)	(171 682)	(176 057)	(180 520)
Impôt total	**($Can an^{-1})**	**(1 614 519)**	**(143 364)**	**(147 173)**	**(151 059)**	**(155 021)**	**(159 064)**	**(163 187)**	**(167 392)**	**(171 682)**	**(176 057)**	**(180 520)**
Revenus nets totaux (RNAI)	**($Can an^{-1})**	**3 767 212**	**334 517**	**343 404**	**352 470**	**361 717**	**371 149**	**380 769**	**390 582**	**400 591**	**410 800**	**421 214**
Coûts en capitaux												
Coût total en investissement (INVE)	($Can)	(963 609)	(963 609)									
Valeur résiduelle des équipements (VARE)	($Can)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Dotation à l'amortissement (DOAM)	($Can)	963 609	96 361	96 361	96 361	96 361	96 361	96 361	96 361	96 361	96 361	96 361
Fonds de roulement (TFOR)	($Can)	125 688	0	0	0	0	0	0	0	0	0	125 688
Flux monétaire net annuel (FMNA)	**($Can an^{-1})**		**(532 731)**	**439 765**	**448 831**	**458 078**	**467 509**	**477 130**	**486 943**	**496 952**	**507 161**	**643 263**
Flux monétaire net cumulatif (FMNC)	**($Can)**		**(532 731)**	**(92 966)**	**355 865**	**813 942**	**1 281 452**	**1 758 581**	**2 245 524**	**2 742 476**	**3 249 637**	**3 892 900**
Coûts globaux du procédé (sur 10 ans) (CGP)	**($ m^{-3})**	**13**										
Période de remboursement (PRI)	**(années)**	**2,21**										
Profit net total (PNT)	**($Can)**	**3 892 900**										
Profit net actualisé (VAN)	**($Can)**	**2 609 229**										
Taux de rendement interne (TRI)	**(%)**	**84,28**										

L'observation du Tableau 3.39 montre que l'exploitation de la filière en mode industriel permettrait d'obtenir des revenus nets totaux (RNAI) sur de 10 ans de 3 767 K$ Can à raison de 434 K$ comme revenus nets pour la première année et 421 K$ pour la dixième année d'exploitation. Ce scénario est basé sur des revenus unitaires de 20 $ par mètre cube de lisier traité. Les coûts totaux d'opération (CTOP) subissent une augmentation de l'ordre de 100 K$ pour passer de 782 K$ lors de la première année d'exploitation à 904 K$ au cours de la dixième année. L'analyse de flux démontre que le procédé de séparation solide liquide du lisier bovin utilisant le Zetag comme floculant est viable et rentable à long terme. Il serait possible de réaliser les remboursements liés aux investissements de base sur une période de 2,21 ans (Période de remboursement PRI). Le flux monétaire net cumulatif (FMNC) pour la dixième année serait de 3 893 K$.

CHAPITRE 4 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

L'implantation de procédés de traitement constitue une urgence pour la gestion du lisier issu de l'élevage Bovin en Amérique du Nord. L'absence de technologies efficaces de traitement et l'épandage excessif du lisier apportent de nombreuses complications environnementales qui se répercutent sur la qualité de l'eau et des sols de plusieurs régions du Québec. L'élevage intensif bovin est en expansion au Québec et devra tôt ou tard se munir de technologies de traitement du lisier pour faire face aux nouvelles règlementations.

Au cours de cette recherche, deux technologies distinctes de traitement du lisier bovin ont été étudiées. Celles-ci sont basées sur le principe de la floculation des particules solides contenues dans un liquide à forte charge organique issu d'une étape de pré-tamisage de lisier bovin. Ces deux technologies présentaient des résultats intéressants et prometteurs. L'électrocoagulation et l'utilisation de polymères produisent des liquides finaux allégés en P, N, ST et MES qui seraient utilisables à la ferme comme engrais pour les cultures environnantes.

Les essais réalisés sur l'utilisation de l'électrocoagulation au sein d'un procédé de séparation S/L du lisier bovin ont montré que cette technique permettait de concentrer les MES dans la fraction solide du lisier et d'appauvrir la fraction liquide en MES et en nutriments. Dans les meilleures conditions, l'électrocoagulation des particules en suspension a entraîné la concentration de 98% du P_{tot} et du N-NTK dans la portion solide. Ces résultats sont encourageants pour l'avenir des technologies utilisant la mise en solution de métaux en cellule électrolytique.

Ces travaux se démarquent de la majorité des procédés utilisant l'électrocoagulation dans un processus de séparation S/L qui sont généralement appliqués au traitement de liquides présentant des charges organiques et des concentrations en particules nettement inférieures à celles

rencontrées dans le lisier. Or, il est possible d'affirmer que cette technologie s'adapte à de telles conditions. Il est nécessaire de réaliser un pré-traitement et une dilution afin de faciliter la séparation. La mise au point d'un procédé en boucle, avec recirculation du liquide final permet de considérables économies d'eau (Figure 4.1). Dans le cadre de la présente recherche, bien que la formation des fractions solide et liquide par électrocoagulation ait clairement été observée et démontrée, il a été techniquement difficile de réaliser la séparation S/L finale. En effet, les flocs produits par cette technologie sont fragiles et instables. Les recommandations concernant la mise au point d'une filière de séparation solide liquide du lisier bovins utilisant l'électrocoagulation sont les suivantes :

- Ajouter une étape de floculation à l'aide d'un polymère anionique en faible concentration susceptible de réagir avec les flocs d'hydroxydes ferriques en solution. L'utilisation d'un polymère anionique permettrait en effet de renforcer la cohésion des flocs, facilitant les étapes de séparation finale et de traitement subséquent.
- Le procédé recommandé pour la mise au point d'une filière de séparation S/L du lisier bovin utilisant l'électrocoagulation comme processus de concentration des particules et nutriments, suivi d'une étape de floculation à l'aide d'un polymère est présenté à la Figure 4.1.

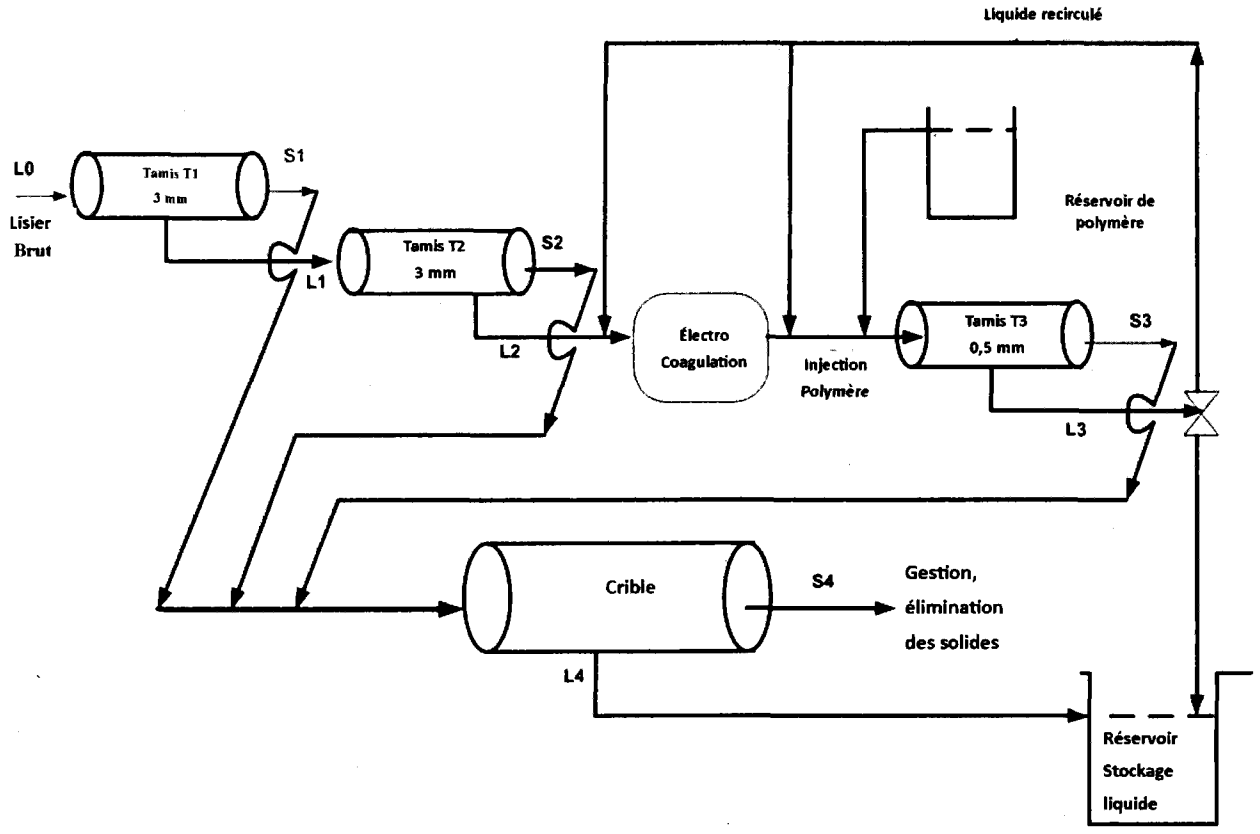

Figure 4.1 **Schéma de la filière de traitement suggérée pour la séparation S/L du lisier bovin utilisant l'électrocoagulation**

L'utilisation des polymères en faible concentration, comme processus de floculation au sein d'une filière de séparation S/L du lisier bovin, a permis d'atteindre les objectifs fixés au début de ce projet de recherche. La filière de traitement est rapide, facile à opérer et à automatiser, générant des fractions solides aisément transportables, ainsi qu'un liquide final allégé en particules et nutriments qui pourra être épandu au champ causant moins de dommages que le lisier brut tel qu'il est géré actuellement. L'étape de pré-tamisage se déroule rapidement et permet, à elle seule, de retenir sur les tamis une grande partie des solides et des nutriments qui

sont à l'origine de la problématique à résoudre. Elle génère des résidus solides présentant une siccité de 12 ± 1% ST, qui sont transportables à la pelle et en camion benne.

L'étape de floculation génère un liquide final ayant des caractéristiques rejoignant les objectifs de traitement: ST: 1,4 ± 0,3%; MES: 3,1 ± 1,1 g L^{-1}; P_{tot}: 0,12 ± 0,01 g L^{-1}; N-NTK: 1,4 ± 0,1 g L^{-1}. Les taux d'enlèvement des solides et des nutriments pour les tests de reproductibilité au laboratoire sont de 92 ± 6% ST; 76 ± 3% P_{tot} et 57 ± 5% N-NTK.

Les essais réalisés au pilote pré-industriel sur le procédé physico-chimique de séparation S/L du lisier bovin utilisant les PAMs ont permis de concentrer 76,4% du P_{tot} et 77,0% du N-NTK dans des fractions solides. Les fractions solides issues de l'étape de pré-tamisage présentent toutes des valeurs de ST supérieures à 12% ST, ce qui répond largement aux attentes. Un écart a cependant été constaté entre les résultats obtenus au laboratoire et au pilote. Les concentrations du liquide final en MES, ST et nutriments sont plus élevées au pilote. Les équipements utilisés pour les tests réalisés au laboratoire sont moins adaptés à ceux qui seraient utilisés si le procédé était exploité à l'échelle industrielle. La séparation après floculation à l'aide de PAMs a été réalisée au pilote à l'aide d'un tamis tangentiel. Il a été difficile de maintenir le débit recommandé par le fournisseur du tamis et donc de réaliser la séparation selon les caractéristiques opératoires optimales.

Les essais réalisés sur la filière de traitement utilisant les PAMs en mode continu ont montré un phénomène notable, aussi bien au pilote que durant les tests de laboratoire. Une augmentation des MES au fil des boucles a été observée. Ceci s'explique par le fait que le liquide recirculé immédiatement après la séparation finale, contient des particules résiduelles.

Les recommandations concernant la mise au point d'une filière de séparation solide liquide du lisier bovins utilisant l'électrocoagulation sont les suivantes :

- L'ajout d'une étape ultime de coagulation (1 g L^{-1}, 10% v/v) au pilote, couplé à l'utilisation d'un tamis de maillage plus fin (250 µm)
- La Figure 4.2 présente le schéma de la filière de séparation S/L du lisier bovin utilisant les polymères, tel que suggérée par les résultats de cette étude, pour un mode de traitement industriel. La présence d'un réservoir de stockage devrait contribuer à l'élimination des particules par décantation. Le temps de rétention devrait être adapté en conséquence.

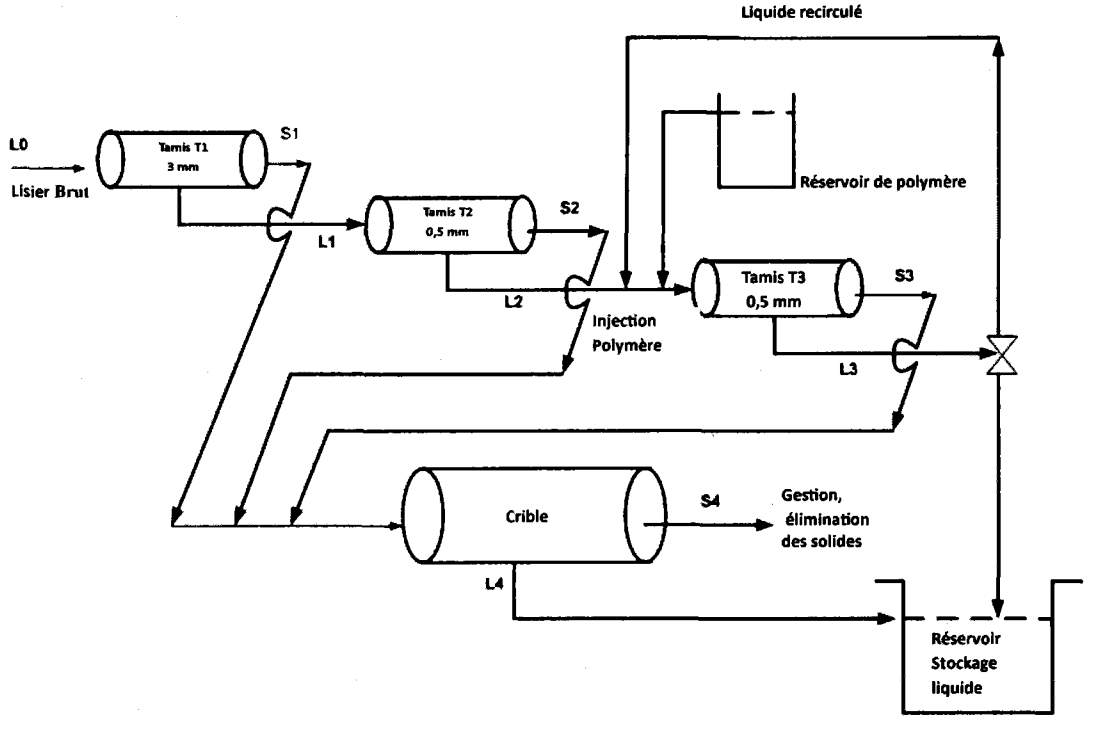

Figure 4.2 **Schéma de la filière de traitement suggérée pour la séparation S/L du lisier bovin utilisant les PAM comme floculant**

L'analyse technico économique de la filière utilisant les PAMs comme floculant au sein d'un procédé de séparation S/L du lisier bovin permet de conclure que la mise en service d'une unité de traitement capable de recevoir et de traiter 200 m^3 de lisier bovin par jour permettrait d'atteindre un coût d'exploitation de 12,41 \$ m^{-3} de lisier bovin traité. Les coûts d'exploitation associés à ce type de traitement adaptés aux résidus de fermes au Québec varient entre 10 \$ m^{-3} et 20 \$ m^{-3}. Il est possible de conclure que le procédé dédié à la séparation S/L du lisier bovin utilisant les PAMs tel que mis au point lors de la présente étude est viable, commercialisable et concurrentiel en rapport avec les technologies existantes. Compte-tenu de la proximité des fermes bovines en région rurale, il est recommandé d'installer un centre de traitement dans une région d'élevages intensifs, ce qui permettrait d'augmenter la capacité de traitement de l'usine et donc de diminuer le coût d'exploitation du procédé. À titre d'exemple, un centre de traitement ayant une capacité de 500 m^3 jr^{-1} permettrait d'atteindre un coût d'exploitation de 8,22 \$ m^{-3} traité. Des essais ont déjà montré leur faiblesse au Québec, il est bien important d'évaluer la viabilité d'un tel centre à long terme surtout en ce qui concerne les questions de logistique et de gestion du transport.

L'utilisation de PON au sein de procédé de traitement de lisier, est dans ces premiers balbutiements. Il a été démontré au cours de cette étude que le chitosan, polymère naturel, présent en grande quantité dans la nature et fabriqué à partir des carapaces de crevettes et autres crustacés, offrait de très bonnes performances en terme de floculation des particules solides à partir du lisier pré-tamisé et dilué. En effet, il permet de concentrer 89% des ST, 65% du P_{tot} et 70% du N-NTK dans une fraction solide à partir du lisier brut. Cependant, la qualité du liquide final ne rejoint pas les objectifs de recherche (Tableaux 3.16 à 3.18). Il convient aussi de noter que pour des résultats moins performants, il faut cinq fois plus de chitosan que de Zetag, sachant

que le chitosan coûte plus cher que le Zetag. Le choix de polymère pour une filière industriel ne pourrait donc pas être porté sur le chitosan. Il ne fait aucun doute que l'arrivée des PON sur le marché des technologies de traitement des résidus industriels va amener à de nouvelles formulations et conduire à une baisse du prix de ces derniers. Bien que la preuve n'ait jamais été faite concernant les risques reliés à la libération de PAMs dans l'environnement, l'utilisation des PONs au sein des procédés à venir est encouragée. En plus d'être constitués à partir de ressources renouvelables abondantes dans l'industrie agro-alimentaire, les PONs comme le chitosan sont considérés comme des produits n'ayant aucun effet nocif sur l'environnement.

BIBLIOGRAPHIE

Abella A., H. Bernard et M. Trahan (2006) Visite d'une station de traitement de lisier conçu par Synertec. Compte rendu no. 5, SynerTEC, Taulé, Bretagne, France, 8 p.

ACAT (Applied Chemicals Anwendungs Technik) (2006) High efficiency polyelectrolytes for municipal sewage and industrial wastewater treatment. Technical Information. CIBA, ZETA and MAGNAFLOC Acat.com, 7 p.

Agridirect (2013) Laboratoire d'analyses agricoles et agroalimentaires. Certifié ISO / CEI 17025. Site web: http://www.agridirect.ca.

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). Standards methods for examination of water and wastewaters. 20th Edition. American Public Health Association, Washington, DC, États-Unis.

Asselin M., P. Drogui, H. Benmoussa et J.F. Blais (2008) Effectiveness of electrocoagulation process in removing organic compounds from abattoir wastewater using monopolar and bipolar electrolytic cells. Chemosphere, 72: 1727-1733.

Association Canadienne des Producteurs de Bovins (2003) Perspective sur la nutrition: Comprendre l'utilisation des antibiotiques et substances hormonales en production bovine. Centre d'information sur le bœuf, 8 p., Site web : www.boeufinfo.org.

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., D. Massé, C. Laguë, M. Fortier et D. Côté (1997) Les fumiers bovins laitiers: une ressource qui se gère. Symposium sur les bovins laitiers, CPAQ, Québec, QC, Canada, 36p.

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.

Beline F. (2001) Étude des transferts d'azote par nitrification/dénitrification (N_2, N_2O, NH_3) au cours du traitement aérobie et du stockage du lisier de porc. Thèse de doctorat en Agrochimie, Université de Perpignan, Perpignan, France, 156 p.

Bennajah M. (2007) Traitement des rejets industriels liquide par électrocoagulation/électroflotation en réacteur airlift. Thèse de doctorat en génie des procédés et de l'environnement, Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 204 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): 397-400.

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. Brevet américain No. 7.156.999 B2.

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

Boutin F. (2002) Commission sur le developpement durable de la production porcine au Québec. Plan Agroenvironnemental de la Production Porcine au Québec. Sainte-Marie de Beauce, Québec. 22 p.

Brown, T. (2007). Engineering economics and economic design for process engineers. CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, Floride, États-Unis, 347 p.

Bureau d'études industrielles (BEI) Énergies Renouvelables et environnement (ERE) (2003) Groupe No. 5: Projet d'implantation d'un réseau d'eau potable dans la ville de Mbanza-Ngungu au Congo. Site web : http://www.enseeiht.fr/travaux/.

Chabalier P.F., V. van de Kerchove et H. Saint Macary (2006) Guide de la fertilisation organique à la Réunion. Chambre d'agriculture de la réunion. Mission de Valorisation Agricole des Déchets. Ile de la Reunion, France, Chap. 5.

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.

Chouinard P. et D. Massicotte (2000) Guide des pratiques de conservation en grandes cultures, module 3: Gestion de la matière organique. Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec, CPVQ, Québec, QC, Canada, 12 p.

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., Envirogain et Zenon Environmental (2006) Traitement tertiaire (polissage) du lisier de porc par un bioréacteur à membranes (BRM) immergées. Projet no 703035, École polytechnique de Montréal, Montréal, QC, Canada, 142 p.

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, 35 p.

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

CRAAQ (2003) Charges fertilisantes des effluents d'élevage. Site web : http://pub.craaq.qc.ca/Transit/2-Protocoles_Echantillonnage.pdf.

CREAQ (1999) Fumier de ferme: production. Comité des références économiques en agriculture du Québec. GÉARGRI.inc., AGDEX 538/400.27. 6 p.

Damien A., F. Bichon Lhermitte, C. Cognot et J. Miquel (1992). Électrocoagulation et électrofloculation. Épuration électrolytique des effluents urbains. RGE, 3: 24-28.

Day D.L. et T.L. Funk (1998) Processing manure: physical, chemical and biological treatment. Dans: 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.

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. Bioresearches, New Zealand, 61 p.

Drogui P., G. Mercier, J.F. Blais, M.C. Boudreault et M. Chartier (2005). Évaluation de la performance du procédé d'électrocoagulation et de la technique de floculation utilisant des polymères naturels pour le traitement et la séparation S/L du lisier de porc. Rapport de recherche R-830, INRS-ETE, Université du Québec, Québec, QC, Canada, 39 p.

Drogui P., J.F. Blais et G. Mercier (2007) Electrochemical technologies for environmental applications. Recent Patents Eng., 1: 257-272.

Drogui P., M. Asselin, S.K. Brar, H. Benmoussa et J.F. Blais (2009) Electrochemical removal of organics and oil from sawmill and ship effluents. Can. J. Civ. Eng., 36(3): 529-539.

Environnement Matériels Objectifs (2012) Spécialiste du traitement des boues, des eaux usées, eaux potables et eau industrielle, station d'épuration, et filtre à bande. Site web : http://www.emo-france.com/.

FAO (1999) Livestock and environment toolbox, Livestock environment and development (LEAD) initiative. Rome, Italie, Site web : http://www.virtualcentre.org/en/dec/toolbox/homepage.htm.

Fédération des producteurs porcins du Québec (FPPQ) (2005) Rapport d'évaluation des technologies de gestion et de traitement du lisier de porc. Site web : http://www Leporcduquebec.qc.ca/fppq/pdf/2005-03-21_traitement_de_lisier.pdf

Feng C., N. Sugiura, S. Shimada et T. Maekawa (2003) Development of a high performance electrochemical wastewater treatment system. J. Hazard. Mater., B103: 65-78.

Foster R.C. (1981) Polysaccharides in soil fabric. Science, 214: 665-667.

Fournier A. et L. Morneau (2001) Comment faire le bon choix d'additifs. Agri-Réseau, Bovins Laitiers, Région Centre du Québec, QC, Canada, 15 p.

Fruteau H., Y. Membrez, J. Dovat et C. Tacchini (2007) Développement d'un concept combiné de production de biogaz et d'élemination de l'ammoniac appliquée aux effluents agricoles. EREP SA, Aclens, Suisse, 50 p.

Fugère R., N. Mameri, J.E. Gallot et Y. Comeau (2005) Treatment of pig farm effluents by ultrafiltration. J. Membr. Sci. 255: 225-231.

García H., C. Rico, P.A. García et J.L. Rico (2007) Flocculants effect in biomass retention in a UASB reactor treating dairy manure. Department of chemical engineering and inorganic chemistry, University of Cantabria, Los Castros, Santander, Espagne, 9 p.

Garcia M.C., A.A. Szogi, M.B. Vanotti, J.P. Chastain et P.D. Millner (2008) Enhanced solid–liquid separation of dairy manure with natural flocculants. Biores. Technol., 100: 5417-5423.

García-Ochoa F., V.E. Santos, L. Naval, E. Guardiola et B. López (1999) Kinetic model for anaerobic digestion of livestock manure. Enz. Microbiol. 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. Biores. Technol., 97(3): 391–395.

Gee C.S., J.T. Pfeffer et M.T. Suidan (1990) *Nitrosomonas* and *Nitrobacter* interactions in biological nitrification. J. Environ. Eng. Div. ASCE, 116(1): 4-17.

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.

Giroux M., L. Deschênes et R. Chassé (2004) Bilan de transfert des éléments traces métalliques dans une prairie et un champ de maïs-grain fertilisés avec des engrais minéraux et des engrais de ferme. Cahiers de l'Observatoire de la qualité des sols, IRDA, Cahier no. 3, 34 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, Alberta Farm Machinery Research Centre, Lethbridge, Alberta, Canada, 8 p.

Hébert M. (2005) Épandage automnal des MRF – risques environnementaux et mesures préventives. Agrosol, 16(1): 61-62.

Holt P.K., G.W. Barton et C.A. Mitchell (2004) The future for electrocoagulation as a localised water treatment technology. Chemosphere, 59: 355-367.

Hong K. et S.P. Meyers (1989) Crawfish chitosan as a coagulant in recovery of organic compounds from seafood processing streams. J. Agric. Food Chem., 37: 580-583.

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. Biores. Technol., 83: 27–36.

Kurita K. (2006) Chitin and chitosan: Functional biopolymers from marine crustaceans earth and environmental science. Marine Biotechnol., 8(3): 203-226.

Laridi R., P. Drogui, H. Benmoussa, J.F. Blais et J.C. Auclair (2005) Removal of refractory organic compounds in liquid swine manure obtained from a biofiltration process using an electrochemical treatment. J. Environ. Eng. Div. ASCE, 131(9): 1302-1310.

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.

Lee S.M., J.Y. Jung et Y.C. Chung (2001) Novel method for enhancing permeate flux of submerged membrane system in two-phase anaerobic reactor. Water Res., 35: 471–477.

Léonard E. (2007) Projet bœuf qualité plus. Union des Producteurs Agricoles, Longueuil, QC, Canada.

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. Site web: http://www Lpes.org/Lessons/Lesson01/1_Environmental_Stewradship.html.

London Metal Exchange (2012) Prix des métaux sur le marché. Site web : http://www.lme.com.

Mantovi P., G. Bonazzi, E. Maestr et N. Marmiroli (2003) Accumulation of copper and zinc from liquid manure in agricultural soils and crop plants. Plant Soil, 250(2): 249-257.

Martinez-Carballo E., C. Gonza´lez-Barreiro, S. Scharf, O. Gans (2006) Specific exposure data of selected veterinarian antibiotics in manure and samples of agriculturally used soils are reported for the first time in Austria. Elsevier, Amsterdam, Pays-Bas, 10 p.

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

Massé L., D.I. Massé, Y. Pellerin (2007b) The use of membranes for the treatment of manure: a critical literature review. Biosyst. Eng., 98: 371-380.

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

Meek, B.D., L.E. Graham, T.J. Donovan et K.S. Mayberry (1979) Phosphorous availability in a calcareous soil after high manure application rates. Soil Sci. Soc. Am., 43: 741-744.

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, QC, Canada, 16 p.

Meunier N., M. Chartier, G. Mercier et J.F. Blais (2009) Treatment of pig manure by biological flotation. Pilot-scale study. J. Environ. Eng. Div. ASCE, 135(9): 869-875.

Ministère de l'Environnement (2002) Règlement sur les exploitations agricoles. Québec, QC, Canada, 23 p.

Ministère de l'Environnement (2003) Synthèse des informations environnementales disponibles en matière agricole au Québec. Envirodoq ENV/2003/0025, Direction des politiques du secteur agricole, Québec, QC, Canada, 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, QC, 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, QC, Canada, 127 p.

Ministère du Développement Durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP) (2007) Addenda No. 2 du guide sur la valorisation des matières résiduelles fertilisantes - Critères de référence et normes réglementaires. Québec, QC, 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.

Mottot Y. (2000) Coagulants et floculants. 279^{e} Conférence de l'Université de tous les savoirs. Paris, France, 10 p.

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.

Ndayegamiye A. et D. Côté (1996) Effet de l'application à long terme de fumier bovin et de lisier de porc et d'engrais minéral sur la teneur en matière organique et la structure du sol. Agrosol, n^{o} IX (1), 35 p.

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. Biores. Technol., 70: 23-31.

Peters M.S. et K.D. Timmerhaus (1991). Plant design and economics for chemical engineers. 4th Edition, McGraw-Hill, New York, NY, États-Unis.

Pieters J.G., G.J. Neukermans et B.A. Clanbeen (1999) Farm-scale membrane filtration of sow slurry. J. Agric. Eng. Res., 73: 403–409.

Pinatton M. (2007) Séparation du lisier bovin par le procédé de flottation biologique LISOX. Mémoire de maîtrise, INRS-ETE, Université du Québec, Québec, QC, Canada, 174 p.

Renault F., B. Sancey, P.M. Badot et G. Crini (2009) Chitosan for coagulation/flocculation processes – An eco-friendly approach. Eur. Polymer J., 45: 1337–1348.

Revy P.S., C. Jondreville, J.Y. Dourmad et Y. Nys (2003) Le zinc dans l'alimentation du porc: Oligo-élément essentiel et risque potentiel pour l'environnement. INRA Prod. Anim., 16(1): 3-18.

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

Schlüsener M.P., K. Bester et M. Spiteller (2003) Determination of antibiotics such as macrolides, ionophores and tiamulin in liquid manure by HPLC–MS/MS. Anal. Bioanal. Chem., 375: 942–947.

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

Shin J.H., S.M. Lee; J.Y. Jung, Y.C. Chung et S.H. Noh (2005) Enhanced COD and nitrogen removals for the treatment of swine wastewater by combining submerged membrane bioreactor (MBR) and anaerobic upflow bed filter (AUFB) reactor. Proc. Biochem., 40: 3769–3776.

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.

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 (2007). 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.

Tessier M. (2000) Échantillonnage des engrais de ferme (Été 2000-2001). Rapport d'activités du projet, Conseil pour le développement de l'agriculture au Québec, Montréal, QC, Canada, 6 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.

Ulrich G.D. (1984) A guide to chemical engineering process design and economics. John Wiley & Sons, New York, NY, États-Unis, 472 p.

USDA (2004) US agriculture and forestry greenhouse gas inventory: 1990-2001. U.S. Department of Agriculture, Global climate change program, Site web: http://www.usda.gov/oce/ global_change/gg_inventory.htm.

Vanotti M.B. et P.G. Hunt (1999) Solids and nutrient removal from flushed swine wastewater using polyacrylamides. Trans. Am. Soc. Agric. Eng., 42(6): 1833-1840.

Vanotti M.B., P.G. Hunt et A.A. Szöggi (1996) Solids and nutrient removal from swine wastewater using polyacrylamides. Coastal Plains Soil, Water and Plant Research Center. U.S. Department of Agriculture. Agricultural Research Service. Florence, Caroline du Sud, États-Unis, 12 p.

Viau J.M et Y. Normandin (1990) Étude sur le traitement de polissage par osmose inverse de l'effluent de la station pilote de Saint-Elzéar pour le traitement du lisier de porc. Ministre de l'Environnement et de la Faune du Québec, Québec, QC, Canada.

Vindis P., B. Mursec et D. Stajnko (2009) The comparison of mesophilic and thermophilic anaerobic digestion. Chapter 27. Dans : DAAAM International Scientific Book 2009, Katalinic B. (Éditeur), DAAAM International, Vienne, Autriche, pp. 251-260.

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, 12 p.

Xing G.X., S.F. Zhang, B.Z. Ju et J.Z. Yang (2005) Recent advances in modified starch as flocculant. Proceedings of the 3rd International Conference on Functional Molecules, Dalian University of Technology, Dalian, China, 6 p.

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.

Zhang R.H., P. Yang, Z. Pan, T.D. Wolf et J.H. Turnbull (2004). Treatment of swine wastewater with biological conversion, filtration, and reverse osmosis: a laboratory study. Trans. ASAE, 47, 243–250.

Zitomer D.H., T.C. Bachman et D.S. Vogel (2005) Thermophilic anaerobic digester with ultrafilter for solids stabilization. Water Sci. Technol., 52, 525–530.