Recherche exploratoire de filières alternatives de valorisation des solides issus des systèmes de séparation disponibles commercialement au Québec en regard des marchés au Québec

Rapport final

Présenté au :

Conseil pour le développement de l'agriculture du Québec

Responsable :

Louise-Andrée Larose, agr.
Fertior

Décembre 2007

Le rapport peut être cité comme suit :

Larose, L-A., S. Godbout, M. Belzile, V. Dufour, M. Trahan, F. Pouliot G. Bellemarre, S. P. Lemay. 2007. Recherche exploratoire de filières alternatives de valorisation des solides issus des systèmes de séparation disponibles commercialement au Québec en regard des marchés au Québec. Rapport final présenté au CDAQ. FERTIOR, IRDA, CDPQ et CRIQ, Québec, QC, Canada. Projet CDAQ #704026. 94 pages.

ISBN – 13 :
ISBN – 10 :
Dépôt légal – Bibliothèque nationale du Canada, 2007
Dépôt légal – Bibliothèque nationale du Québec, 2007
© Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc.(IRDA)

Recherche exploratoire de filières alternatives de valorisation des solides issus des systèmes de séparation disponibles commercialement au Québec en regard des marchés au Québec

Rapport final

Présenté au :

Conseil pour le développement de l'agriculture du Québec
555, boul. Roland-Therrien, bureau 110
Longueuil (Québec) J4H 4E7

Préparé par :

Louise-Andrée Larose, agr.
Directrice générale,
Fertior

Stéphane Godbout, ing., P.Eng., agr., Ph.D.
Chercheur en génie agroenvironmental,
IRDA

Martin Belzile, ing.jr., M.Sc
Professionnel de recherche,
IRDA

Valérie Dufour, M.Sc.
Chargé de projet,
CDPQ

Maryse Trahan, agr.
Chargé de projets,
Fertior

Francis Pouliot, ing., M.B.A.
Ingénieur recherche et développement,
CDPQ

Guy Bellemare, ing., M.Sc.A.
Agent de recherche,
CRIQ

Stéphane P. Lemay, ing., P.Eng., Ph.D.
Chercheur en génie agroenvironmental,
IRDA

Équipe de réalisation du projet :

Responsable :	Louise-Andrée Larose, Fertior
Responsable scientifique:	Stéphane Godbout ing. P.Eng, agr., Ph.D., IRDA
Chargés de projet:	Maryse Trahan, agr., Fertior Martin Belzile, ing. jr., M.Sc., IRDA Valérie Dufour, M.Sc., CDPQ
Collaborateurs:	Francis Pouliot, ing. M.B.A., CDPQ Guy Bellemare, ing. M.Sc.A., CRIQ Stéphane P. Lemay, ing., P.Eng., Ph.D., IRDA

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

Stéphane Godbout
Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA)
2700, rue Einstein
Sainte-Foy (Québec) G1P 3W8

Téléphone : (418) 646-1075
Télécopieur : (418) 644-6855
Courriel : stephane.godbout@irda.qc.ca

Remerciements :

Les auteurs remercient le Conseil pour le développement de l'agriculture du Québec pour sa contribution financière à ce projet de recherche. Des remerciements sont également adressés à Fertior, au CDPQ, au CRIQ et à l'IRDA pour leurs contributions en nature à cette étude. Les auteurs sont également reconnaissants de l'appui technique de Johanne Nadeau du CDPQ.

Table des matières

Table des matières i
Liste des tableaux iii
1 Problématique et objectifs du projet 2
1.1 Contexte général 2
1.2 Le traitement et la séparation de phase 2
1.3 Examen de la situation de valorisation au Québec 2
1.4 Préoccupation du milieu 3
1.5 Objectifs du projet 3
2 Méthodologie 5
2.1 Caractérisation des biosolides 5
2.2 L'évaluation des filières de valorisation disponibles 2
2.3 Évaluation technique, environnementale et économique 2
2.3.1 Approche générale 2
2.3.2 Approche simplifiée 4
3 Caractéristiques de la phase solide 5
4 Inventaire des alternatives existantes 9
5 Revue des méthodes de valorisation 10
5.1 Compostage des biosolides 10
5.1.1 Le procédé 10
5.1.2 Aération 11
5.1.3 Température 11
5.1.4 Humidité 12
5.1.5 Les valeurs de pH 12
5.1.6 Ratio C/N 13
5.1.7 Utilisation 13
5.2 Valorisation aux champs des biosolides 14
5.2.1 Description générale et considérations agronomiques 14
5.2.2 Oligo-éléments 15
5.2.3 Application d'automne 17
5.3 La production d'énergie à partir des biosolides 18
5.3.1 Les grandes familles de technologies 18
5.3.2 L'incinération 19
5.3.3 La liquéfaction par conversion thermochimique 20
5.3.3.1 Description 20

5.3.3.2 La température et la pression d'opération 21
5.3.3.3 Le temps de rétention 21
5.3.3.4 Les caractéristiques de l'intrant 21
5.3.3.5 Le gaz catalyseur 22
5.3.3.6 Produits résultants 22
5.3.3.7 Rejets 23
5.4 L'enfouissement des biosolides 23
5.5 Le séchage des biosolides 24
5.6 La granulation des biosolides 25
6 Analyse et discussion 26
7 Conclusion 28
8 Références 30

Liste des tableaux

Tableau 1. Caractéristiques pertinentes des systèmes de séparation ou de valorisation des lisiers.....5

Tableau 2. Critères utilisés par le groupe « transfert technologique » pour l'évaluation des différentes technologies de gestion et de traitement du lisier de porc.....3

Tableau 3. Critères utilisés pour l'évaluation des technologies de valorisation des biosolides. 4

Tableau 4a. Compilation des caractéristiques des biosolides issus des systèmes de séparation disponibles commercialement au Québec. 5

Tableau 4b. Compilation des caractéristiques des biosolides issus des systèmes de séparation disponibles commercialement au Québec. 6

Tableau 5. Conditions recommandées pour le compostage d'engrais solide 10

Tableau 6. Concentrations maximales recommandées (ppm) de métaux lourds dans les sols, selon la capacité d'échange cationique (CEC) 15

Tableau 7. Impact sur les apports en éléments fertilisants de l'application de lisier brut de porc et de la fraction solide issue d'une séparation. 16

Tableau 8. Évaluation des filières de valorisation des biosolides de lisier de porc* 26

1 Problématique et objectifs du projet

1.1 Contexte général

Dans le contexte social actuel où la conscientisation environnementale ne cesse de s'accroître au sein de la population québécoise, la filière porcine se voit souvent diabolisée dans le discours populaire. Ce phénomène rend la viabilité de cette production de plus en plus vulnérable. Afin de répondre aux pressions environnementales, plusieurs législations ont été mises en place, dont une basée sur l'équilibre en phosphore. Cette législation a pour effet d'augmenter les superficies nécessaires pour l'épandage des déjections, amenant plusieurs producteurs porcins vers une problématique de surplus de phosphore. Pour pallier à ce problème, plusieurs institutions ont réalisé des travaux sur la mise au point de systèmes de traitement des fumiers et lisiers. Parmi les différentes solutions étudiées, la séparation de phases semble être une alternative intéressante pour résoudre le surplus de phosphore à la ferme.

1.2 Le traitement et la séparation de phase

Plusieurs familles et types de séparation des phases ont été développés tel que les séparateurs mécaniques, les séparateurs physico-chimiques et l'isolement des fèces et de l'urine sous les lattes. Toutefois, malgré le fait que la séparation de phases semble être de plus en plus connue et applicable à l'échelle d'une entreprise agricole, il demeure que deux fractions (une fraction liquide et une fraction solide) doivent être gérées en fin de procédé. Dans une problématique de surplus de phosphore, les sous-produits solides riches en phosphore générés à la suite de cette séparation doivent être disposés, valorisés ou traités avec une technologie appropriée afin de pouvoir exporter le phosphore hors de la ferme. Les avenues possibles de valorisation sont relativement limitées, peu développées et génèrent des coûts souvent élevés. Cela freine le développement et l'implantation des technologies de traitement de lisier au Québec. Concernant la fraction liquide issue des systèmes de séparation, la valorisation peut se faire par un traitement subséquent ou par l'entremise d'épandage ou d'irrigation. Souvent, ces liquides demeurent des fertilisants ayant des caractéristiques agronomiques avantageuses.

1.3 Examen de la situation de valorisation au Québec

Actuellement au Québec, la valorisation de la phase solide passe généralement par l'épandage aux champs chez des receveurs et parfois par la filière du compostage dans un site reconnu. L'épandage du solide peut comporter des contraintes compte tenu de sa concentration en phosphore, en cuivre et en zinc, de ses caractéristiques physiques en plus de la disponibilité des terres à proximité dans les régions en surplus. La valorisation par compostage comporte également des inconvénients. Advenant que le compostage soit confronté à une mise en marché difficile, à des inconvénients comme la génération de frais importants ou à un impact négatif sur la production de gaz à effet de serre (GES) et d'odeurs, des alternatives devront être explorées. Des efforts de recherche sur des techniques permettant une valorisation hors du circuit agricole traditionnel doivent être déployés afin d'assurer la viabilité des systèmes de traitement des fumiers et lisiers.

1.4 Préoccupation du milieu

Le développement de nouvelles avenues pour les sous-produits de la séparation du lisier répond bien aux recommandations du comité multipartite en gestion des fumiers et d'agriculture durable en Chaudière-Appalaches. En effet, par le biais du mémoire déposé dans le cadre des consultations publiques sur le développement durable au Québec, ce dernier propose « qu'un volet de la recherche soit axé sur la mise en marché des différents sous-produits résultant du traitement des fumiers et lisiers ». De plus, dans un communiqué de presse paru le 3 avril 2007, La MRC de la Nouvelle-Beauce a également demandé aux autorités de favoriser la valorisation des sous-produits de la séparation de phase et l'intégration d'un minimum de phosphore organique dans la fabrication des engrais minéraux au Québec.

Ceci démontre une volonté du milieu d'adopter des solutions et des lois concrètes qui incitent le recyclage des ressources telles que les éléments nutritifs retrouvés dans les fumiers et lisiers traités. Ceci s'intègre de façon très étroite avec les avenues de valorisation des solides issus des systèmes de séparation de phases.

Compte tenu du nombre croissant d'exploitations agricoles désirant s'orienter vers le traitement des fumiers et lisiers, le présent projet s'inscrivait dans cette volonté d'offrir une plus grande souplesse aux producteurs québécois intéressés à traiter leur lisier par séparation de phases et à la disposition adéquate des biosolides produits.

1.5 Objectifs du projet

L'objectif général de ce projet consiste à effectuer une revue de littérature exhaustive (nationale et internationale) des différentes filières de valorisation de la phase solide résultant de la séparation solide-liquide des lisiers. Cette étude devait permettre de cibler les alternatives de valorisation actuellement disponibles représentant un fort potentiel d'application dans le contexte québécois afin d'orienter les recherches pour identifier d'autres avenues en matière de valorisation. Les objectifs spécifiques sont les suivants :

- Déterminer et compiler les caractéristiques des biosolides résultant de différents systèmes de séparation ou de traitement du lisier disponibles commercialement au Québec;
- Réaliser l'inventaire des alternatives de valorisation des biosolides issus des systèmes de séparation ou de traitement existant actuellement au Québec et à travers le monde;
- Cibler les technologies de valorisation des biosolides disponibles ou facilement adaptables au contexte et conditions du Québec;
- Procéder à l'évaluation environnementale, technique et économique initiale des filières de valorisation des biosolides adaptables au contexte québécois dans le cadre d'une agriculture durable;

- Identifier les futures filières possibles de valorisation des biosolides résultant de la séparation ou d'un traitement des lisiers démontrant un fort potentiel d'implantation au Québec en vue d'orienter les efforts de recherche dans le domaine.

2 Méthodologie

2.1 Caractérisation des biosolides

Avant de procéder à l'analyse des différentes avenues de valorisation des biosolides issus de la séparation ou du traitement du lisier, il était essentiel de bien connaître les caractéristiques de ces biosolides. Une liste comportant l'ensemble des caractéristiques pertinentes a donc été créée. Cette liste est présentée au tableau 1.

Tableau 1. Caractéristiques pertinentes des systèmes de séparation ou de valorisation des lisiers

Paramètre	*Unité*	*Valeur*	*Paramètre*	*Unité*	*Valeur*	*Paramètre*	*Unité*	*Valeur*
Nombre d'échantillons	s.u.	…	Calcium (Ca)	mg/kg	…	Cobalt (Co)	mg/kg	…
M.S. lisier de départ	%	…	Magnésium (Mg)	mg/kg	…	Plomb (Pb)	mg/kg	…
M.S. biosolide	%	…	Aluminium (Al)	mg/kg	…	Nickel (Ni)	mg/kg	…
Matière organique	%	…	Bore (B)	mg/kg	…	Arsenic (As)	mg/kg	…
Carbone organique	%	…	Cuivre (Cu)	mg/kg	…	Mercure (Hg)	mg/kg	…
Azote total	mg/kg	…	Fer (Fe)	mg/kg	…	Sélénium (Se)	mg/kg	…
Azote ammoniacal ($N\text{-}NH_4$)	mg/kg	…	Manganèse (Mn)	mg/kg	…	Cendres	%	…
Phosphore (P)	mg/kg	…	Zinc (Zn)	mg/kg	…	C/N	s.u.	…
Phosphore assimilable (P_2O_5)	mg/kg	…	Sodium (Na)	mg/kg	…	pH	s.u.	…
Potassium (K)	mg/kg	…	Cadmium (Cd)	mg/kg	…	Rapport volumique	%	…
Potassium assimilable (K_2O)	mg/kg	…	Chrome (Cr)	mg/kg	…	Rapport massique	%	…

M.S. : matière sèche
s.u. : sans unité

Cette liste a ensuite été acheminée aux différents promoteurs de systèmes de séparation ou de traitement du lisier disponibles sur le marché. Ceux-ci devaient remplir les cases avec l'information disponible. Les différents promoteurs de technologies qui ont été sollicités pour donner ces renseignements sont les suivants :

- Agri-ventes Brome (tamis tangentiel Maximizer);
- Alfa Laval inc. (décanteur centrifuge);
- Aliment Breton (procédé Séquencia);
- A. Pellerin et fils Ltée;
- Carrière R. Poudrette (Lisitech);

- Centre de recherche industrielle du Québec (CRIQ) (Biosor);
- Corporation HET (séparateur Lisox);
- Envirogain inc. (Biofertile F);
- Enviro-Technologies Mittner inc. (LIPP);
- Équipement G.D.L. Ltée (GDL) (gratte en V);
- Les équipements Laplante et Lévesque Ltée (décanteur centrifuge ASSERVA);
- Les industries et équipements Laliberté Ltée (IEL) (courroie sous les lattes);
- Les industries Fournier inc. (pressoir rotatif);
- Ureco internationnal inc.

2.2 L'évaluation des filières de valorisation disponibles

Une recherche bibliographique exhaustive a été réalisée afin de retrouver le plus d'informations pertinentes possibles concernant les stratégies de valorisation des biosolides, qu'ils proviennent de la transformation du lisier ou non.

En comité, les différentes filières de recherche ont été déterminées. Dans chacune de ces filières, les mots clés principaux ont été identifiés. Une documentaliste a ensuite établi, à partir de ces mots clés, les stratégies de recherche et a interrogé diverses bases de données afin de trouver des articles scientifiques pertinents. Les bases de données qui ont été consultées pour cette fin sont celles de l'ASABE, de Porknet, de CabAbstracts et de Pig New & Information. Plusieurs stratégies faisant intervenir différentes combinaisons des mots-clés ont été utilisées.

De plus, les tables des matières de plusieurs revues techniques ont été consultées afin de compléter l'information recueillie. Parmi ces revues techniques, Atout porc, Réussir porc, Techni porc, Porc magazine, Porc Québec et Manure management ont été fouillées. L'ensemble des exemplaires de l'an 1995 à aujourd'hui on été consultés.

Les articles pertinents aux projets ont été lus et l'information retrouvée a servi à la rédaction de la revue de littérature.

2.3 Évaluation technique, environnementale et économique

2.3.1 Approche générale

En novembre 1996, la fédération des producteurs de porcs du Québec (FPPQ) ainsi que les 25 organisations liées au secteur porcin ont endossé la réalisation d'un plan agro-environnemental. Le Plan agro-environnemental s'est doté alors de plusieurs groupes de travail dont l'un nommé « Transfert technologique ». Ce groupe multidisciplinaire se composait de chercheurs et de praticiens, spécialisés dans la gestion et le traitement des lisiers. En juin 1998, le comité déposait un rapport jetant les bases d'une méthode d'évaluation et de classification des systèmes de traitement. Ce rapport a été ensuite révisé en 2003.

Ce rapport utilise une liste de critères d'évaluation. Cette liste comprend tous les critères essentiels et pertinents tels que les critères environnementaux, agronomiques, techniques, économiques et sociaux (tableau 2) qui permettent d'attribuer une cote pour les différents systèmes de traitement.

Encore aujourd'hui, le comité existe toujours et l'approche utilisée est demeurée fondamentalement la même. Ce comité est reconnu par le milieu et son approche d'évaluation fait l'unanimité depuis plusieurs années. L'approche d'évaluation globale dans le présent projet est donc basée sur la même méthode.

Tableau 2. Critères utilisés par le groupe « transfert technologique » pour l'évaluation des différentes technologies de gestion et de traitement du lisier de porc.

Critères Environnementaux	*Critères sociaux ou reliés à la santé*	*Critères agronomiques*	*Critères techniques*	*Critères économiques*
Réduction des émissions de gaz à effet de serre	Réduction des nuisances olfactives aux bâtiments et à l'entreposage	Contenu en matière organique des sous-produits	Adaptabilité au climat québécois	Réduction des volumes à gérer
Réduction des émissions d'ammoniac	Réduction des nuisances olfactives à l'épandage	Valeur fertilisante (qualité et quantité) des sous-produits	Adaptabilité à la gestion actuelle à la ferme	Sensibilité aux coûts de la main-d'oeuvre
Augmentation du taux de demande des sous-produits	Acceptabilité de la production	Réduction de la compaction des sols	Amélioration des conditions de manutention des produits	Sensibilité aux coûts des intrants
Réduction du transfert des polluants à l'environnement (globalement)	Santé et bien-être du travailleur agricole	Prolongation de la période d'apport possible sur les cultures	Disponibilité des équipements et infrastructures requis	Potentiel d'accroissement de la charge animale
Réduction des impacts négatifs associés à la consistance du produit	Santé et bien-être de la population (risques chimiques et biologiques)	Élargissement de l'éventail des cultures réceptrices	Besoins en intrant (biomasse ou autres)	Adaptabilité à la taille de l'entreprise
Réduction des impacts négatifs associés au volume à gérer (énergie)	Santé et bien-être des animaux (risques chimiques et biologiques)	Amélioration des performances zootechniques	Disponibilité des intrants (niveau provincial)	Sensibilité à la distance de transport du produit
Diminution des risques d'accidents d'opération et de déversement		Réduction de la toxicité des produits	Besoin 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
Besoin d'ajout de substances nocives			Besoin d'entretien	Durée de vie utile de l'équipement
Besoin 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	

2.3.2 Approche simplifiée

Puisque la méthode développée par le groupe de travail « transfert technologique » était destinée à évaluer les systèmes de traitement, plusieurs des critères étaient inutilisables ou moins pertinents dans un contexte d'évaluation de filière de valorisation des biosolides. Par conséquent, une version adaptée et allégée a été mise sur pied. De plus, puisque l'aspect agronomique s'appliquerait seulement à des technologies de valorisation favorisant le retour des sous-produits à la terre, ce critère a été remplacé par l'évaluation à proprement dit du sous-produit. Le tableau 3 représente le résultat de la modification du tableau.

Tableau 3. Critères utilisés pour l'évaluation des technologies de valorisation des biosolides.

Critères Environnementaux	*Critères sociaux ou reliés à la santé*	*Critères valeur du sous-produit*	*Critères techniques*	*Critères économiques*
Pollution de l'air	Impact sur les odeurs	Besoin en intrants exogènes	Adaptabilité à la gestion actuelle à la ferme	Sensibilité aux coûts de la main-d'œuvre
Pollution de l'eau	Impacts sur les pathogènes	Amélioration des conditions de manutention des produits	Disponibilité des équipements et infrastructures	Sensibilité aux coûts des intrants
Besoin en énergie non renouvelable		Marché potentiel pour les sous-produits	Disponibilité des intrants	Sensibilité aux coûts d'entretien
			Besoin de support technique	
			Adaptabilité à la variation de la charge à traiter (volume et composantes)	

Le comité de rédaction a choisi de donner une note chiffrée à chacune des filières de valorisation des biosolides et pour chacun des critères listés précédemment. Cette note varie de 1 à 5, 1 étant la note la plus faible et 5 étant la note la plus haute. L'ensemble des notes d'une même filière a ensuite pu être additionné afin de comparer les différentes filières de valorisation entre elles.

Enfin, afin de donner plus de poids à certains des critères jugés plus importants, une pondération a également été établie sur les grandes familles de critères. Ainsi, la pondération utilisée fait en sorte que la note finale qu'obtiendra une filière de valorisation des biosolides sera calculée à partir de 25 % des points qu'elle a obtenu pour les critères environnementaux, de 25 % également pour les critères concernant la valeur du sous-produit, de 20 % pour les critères sociaux ou reliés à la santé alors que les critères techniques et économiques représentent 15 % chacun. Cette approche visait, par exemple, à éviter de déclasser des technologies moins développées et par conséquent plus coûteuses à l'implantation.

3 Caractéristiques de la phase solide

Tel que mentionné précédemment, la connaissance des caractéristiques des biosolides est essentielle afin de développer des avenues intéressantes pour la valorisation. À partir de la liste des caractéristiques demandées, les résultats obtenus des promoteurs peuvent être consultés aux tableaux 4a et 4b.

Tableau 4a. Compilation des caractéristiques des biosolides issus des systèmes de séparation disponibles commercialement au Québec.

Paramètre	*unité*	*Physico-chimique*				*Isolement sous les lattes*	
		Pressoir rotatif	*Séquencia partiel*	*Séquencia complet*	*Lisox*	*Gratte en V*	*Courroies*
Nombre d'échantillons	s.u.	-	-	-	20	10	37
M.S. lisier de départ	%	-	2	2	4	-	-
M.S. biosolide	%	24	15	7	18	29	28
Matière organique	%	-	-	-	13	24	22
Carbone organique	%	-	-	-	-	12	11
Azote total	mg/kg	-	4500	6400	6140	15200	11361
Azote ammoniacal (N-NH_4)	mg/kg	2525	1600	1900	1960	3200	1852
Phosphore (P)	mg/kg	6248	760	2000	3540	5000	7600
Phosphore assimilable (P_2O_5)	mg/kg	-	-	-	8000	11000	17400
Potassium (K)	mg/kg	1690	730	880	-	5200	3280
Potassium assimilable (K_2O)	mg/kg	-	-	-	1960	6300	3940
Calcium (Ca)	mg/kg	7008	-	-	8780	4700	14020
Magnésium (Mg)	mg/kg	3053	-	-	2350	2700	1896
Aluminium (Al)	mg/kg	184	-	-	-	96	264
Bore (B)	mg/kg	17	-	-	-	7	3
Cuivre (Cu)	mg/kg	109	-	-	104	195	48
Fer (Fe)	mg/kg	799	-	-	0	424	560
Manganèse (Mn)	mg/kg	176	-	-	113	125	107
Zinc (Zn)	mg/kg	477	-	-	280	251	337
Sodium (Na)	mg/kg	512	-	-	-	2	790
Cadmium (Cd)	mg/kg	-	-	0,035	-	-	-
Chrome (Cr)	mg/kg	-	-	0,529	-	-	-
Cobalt (Co)	mg/kg	-	-	0,509	-	-	-
Plomb (Pb)	mg/kg	-	-	0,12	-	-	-
Nickel (Ni)	mg/kg	-	-	0,953	-	-	-
Arsenic (As)	mg/kg	-	-	0,151	-	-	-
Mercure (Hg)	mg/kg	-	-	0,005	-	-	-
Sélénium (Se)	mg/kg	-	-	0,535	-	-	-
Cendres	%	-	6	20	-	-	21
C/N	s.u.	-	15	5	-	9	10
pH	s.u.	7,1	-	-	7,4	6,1	6,6
Rapport volumique	%	-	-	-	18		85
Rapport massique	%	-	-	-	19	106	82

M.S. : matière sèche
s.u. : sans unité

Tableau 4b. Compilation des caractéristiques des biosolides issus des systèmes de séparation disponibles commercialement au Québec.

Paramètre	*unité*	*Boue activée*	*Bio-filtration*	*Mécanique*			
		Biofertile F	*Biosor**	*Décanteur centrifuge Asserva*	*Décanteur centrifuge Asserva*	*Décanteur centrifuge Asserva*	*Tamis tangentiel Maximizer*
Nombre d'échantillons	s.u.	20	18	-	-	-	2
M.S. lisier de départ	%	5	-	-	-	-	4
M.S. biosolide	%	25	32	-	-	41	15
Matière organique	%	21	-	-	-	82	89
Carbone organique	%	54	-	-	-	-	-
Azote total	mg/kg	9575	14725	10662	10894	12104	4500
Azote ammoniacal ($N-NH_4$)	mg/kg	150	2889	-	-	3298	1740
Phosphore (P)	mg/kg	11825	4839	7733	12051	7651	1700
Phosphore assimilable (P_2O_5)	mg/kg	27079	-	-	-	-	3893
Potassium (K)	mg/kg	4250	4881	2079	1305	2492	1100
Potassium assimilable (K_2O)	mg/kg	5100	-	-	-	-	2519
Calcium (Ca)	mg/kg	12625	6377	7865	15270	8993	<4110
Magnésium (Mg)	mg/kg	4350	2302	5346	8579	0	<510
Aluminium (Al)	mg/kg	225	121	-	-	147	-
Bore (B)	mg/kg	<200	7	-	-	11	-
Cuivre (Cu)	mg/kg	358	226	124	35	48	-
Fer (Fe)	mg/kg	1398	360	-	-	532	-
Manganèse (Mn)	mg/kg	225	109	-	-	144	-
Zinc (Zn)	mg/kg	468	210	233	318	158	-
Sodium (Na)	mg/kg	1125	1430	-	-	718	-
Cadmium (Cd)	mg/kg	<1	-	-	-	-	-
Chrome (Cr)	mg/kg	5	-	-	-	-	-
Cobalt (Co)	mg/kg	<6	-	-	-	-	-
Plomb (Pb)	mg/kg	<10	-	-	-	-	-
Nickel (Ni)	mg/kg	5	-	-	-	-	-
Arsenic (As)	mg/kg	<6	-	-	-	-	-
Mercure (Hg)	mg/kg	<5	-	-	-	-	-
Sélénium (Se)	mg/kg	<5	-	-	-	-	-
Cendres	%	-	17	-	-	-	-
C/N	s.u.	13	-	-	-	14	9.4, et 16.7
pH	s.u.	7,0	5,7	-	-	8,4	8,7
Rapport volumique	%	15	15	-	-	-	-
Rapport massique	%	12	16	-	-	-	16

M.S. : matière sèche
s.u. : sans unité
* : Biosor est un système permettant de traiter le liquide provenant de la séparation de phase du lisier. Les caractéristiques citées sont celles du biosolide issus de la séparation mécanique précédant le traitement Biosor.

Malheureusement, certains des promoteurs n'ont pas été en mesure de fournir l'information souhaitée à propos de leur technologie. C'est le cas des technologies distribuées par Enviro-Technologies Mittner, Bio-Terre, Alfa Laval, Carrière R. Poudrette, A. Pellerin et fils et Ureco international. De plus, comme le démontrent les tableaux 4a et 4b, plusieurs fournisseurs de

technologies manquent d'information précise sur la caractérisation des biosolides issus de leur technologie. Ceci peut s'expliquer en partie par le fait que certains promoteurs sont uniquement des représentants de l'équipement et n'ont pas de service « clé en main » intégral. Une autre partie de l'explication proviendrait du manque d'historique des différents systèmes. Globalement, peu de promoteurs de technologie ont complété de façon satisfaisante le tableau. L'élément le plus important qui est souvent manquant dans les différentes descriptions des caractéristiques des biosolides est le pourcentage de matière sèche du lisier à partir duquel le traitement a été effectué.

Selon l'information recueillie, la majorité des technologies de séparation permettent d'atteindre un minimum de 15 % de siccité et, dans certains cas, d'atteindre plus de 40 %. De plus, la majorité des technologies produisent des solides ayant une concentration en phosphore (P) relativement élevée. À l'exception du procédé de Séquencia et du tamis tangentiel, les concentrations varient entre 3 500 mg/kg à plus de 12 000 mg/kg. Les valeurs en P_2O_5 varient donc d'environ 8 à 27,5 kg/t de biosolide tandis que celles du lisier brut sont d'environ 1,5 à 3,1 kg/t selon les différentes catégories d'élevage de porcs (CRAAQ, 2007).

La teneur en azote (N) total des biosolides varie également d'un système à l'autre. Les valeurs oscillent entre 4 500 mg/kg pour le Séquencia et le tamis tangentiel et 15 200 mg/kg pour les grattes en V. Il est à noter que certaines variations dans les concentrations des éléments peuvent être reliées à des facteurs externes à l'équipement de séparation. En effet, l'âge des lisiers, l'âge et la catégorie des animaux (engraissement versus maternité) ainsi que la régie d'un site par rapport à un autre ne sont que quelques exemples de facteurs interférant dans les taux d'extraction des éléments fertilisants.

De plus, les concentrations de cuivre varient entre 35 et 358 kg/t et celles pour le zinc varient entre 158 et 477 kg/t. Ces éléments sont importants puisqu'ils peuvent être restrictifs pour certains procédés de valorisation, de traitement ou d'épandage.

La proportion de la matière organique contenue dans le lisier retenue par les différents procédés de séparation varie entre 13 % et 90 %. Une forte proportion de matière organique procure un avantage agronomique à ces produits versus un liquide pauvre en matière organique. Cette propriété change également le comportement des éléments dans les sols. Les concentrations en certains éléments tels que le phosphore peuvent permettre de cibler certaines régions pauvres en phosphore et des cultures exigeantes en cet élément comme fertilisant à privilégier et développer.

Également, le pH varie entre 5,7 pour le système Biosor et 8,7 pour le tamis tangentiel Maximiser. Quant à lui, le rapport C/N se situe en dessous de 17 pour tous les traitements, variant entre 5 pour le système Séquencia et 16,7 pour le tamis tangentiel Maximizer.

Il n'y a aucune donnée sur la présence d'intrants exogènes dans les biosolides issus de systèmes de séparation physico-chimiques dans le tableau. Il est important de mentionner la distinction à faire entre des biosolides issus de systèmes de traitement sans et avec intrants exogènes (ne provenant pas de la ferme). En effet, le règlement sur les exploitations agricoles (REA) n'assujettit pas l'épandage des fumures à une demande de certificat d'autorisation. Par contre, un procédé de traitement avec ajout de produits exogènes fait en sorte que le solide issu de ce

système n'est plus considéré comme une fumure mais plutôt comme une matière résiduelle fertilisante (MRF). Ceci implique à l'heure actuelle qu'une demande de certificat d'autorisation doit être faite pour l'épandage du biosolide et peut éventuellement limiter les avenues de valorisation, dû à un manque d'information sur ces intrants. Ceci engendre encore une fois certaines contraintes (administratives et de « commercialisation ») pour les producteurs qui désireraient valoriser ces fractions par épandage ou compostage; un frein supplémentaire qui diminue le nombre de solutions technologiques offertes et implantées.

Actuellement, les promoteurs ne possèdent pas non plus d'information sur la présence de polyacrylamides ou d'acrylamide dans les biosolides. Dans plusieurs procédés de traitement, les intrants utilisés sont des polyacrylamides, des substances non toxiques sans métaux lourds à dégradation rapide mais formées à partir de la polymérisation d'acrylamide. Cette substance est toxique pour les animaux et pour l'homme. La problématique n'est donc pas associée à l'utilisation des PAM mais plutôt à l'éventuelle formation d'acrylamide par différents mécanismes (Larouche *et al.*, 2005). M. Léon-Étienne Parent, chercheur à l'Université Laval, a effectué une étude afin d'établir un moyen de détecter la présence de polyacrylamide (PAM) et d'acrylamide (AM) dans les biosolides. Deux solides provenant de systèmes physico-chimiques utilisant des polyacrylamides ont été analysés par l'équipe de M. Parent. Dans les deux cas, les résultats étaient sous les seuils de détection de PAM ou AM dans les biosolides (Parent, 2006a).

4 Inventaire des alternatives existantes

Actuellement, la valorisation habituelle des biosolides de lisier de porc est l'épandage dans les champs à l'aide d'un épandeur à fumier solide. Cependant, il existe déjà quelques alternatives à l'épandage. Ces alternatives vont du compostage à la granulation en passant par le séchage. En effet, de nombreux lieux de compostage sont présentement en fonction au Québec. En plus de ces sites de compostage, d'autres installations utilisant différents types de valorisation sont également répertoriées au Québec :

- Acti-sol (granulation de fumier de poules pondeuses);
- Agregat Waterloo (granulation à grande échelle, divers substrats);
- Poudrex (bouletage à petite échelle, divers substrats);
- Thermalco (incinération de fumier de poulet);

Cependant, ces installations ne sont pas dédiées à la valorisation de biosolides de lisier de porc et pourraient nécessiter une certaine adaptation aux caractéristiques des biosolides avant de pouvoir les accueillir.

Ailleurs dans le monde, il existe plusieurs installations permettant de transformer des déjections solides en un sous-produit plus intéressant. Parmi celles-ci, il y a :

- Trois usines de production d'un engrais phosphaté (marque Fibroplus) par le biais de combustion sur lit fluidisé avec de la litière de volaille (Grande-Bretagne et Écosse);
- Cooperl, division Fertival (granulation d'engrais organo-minéral, France);
- Troix plates-formes co-compostage de matériel agricole et de déchets verts (Bretagne);
- Piers Industries (séchage et granulation de fientes de volailles, France);
- Compost et granulation de boues de stations d'épuration (France);

Encore une fois, ces installations ne sont pas nécessairement adaptées à traiter un biosolide provenant de la séparation ou du traitement du lisier de porc.

5 Revue des méthodes de valorisation

5.1 Compostage des biosolides

5.1.1 Le procédé

Les biosolides obtenus à partir de la séparation solide-liquide du lisier de porcs sont odorants et peuvent poser des problèmes lorsqu'ils sont épandus directement aux champs (Georgacakis *et al.*, 1996). Selon Bhamidimarri et Pandey (1996), les résidus solides de porcherie sont fibreux, riches en éléments nutritifs et aisément susceptibles de composter par aérobie. Cependant, immédiatement après la séparation, ils contiennent une grande proportion de substances organiques inaccessibles aux plantes. Également, un grand nombre de microorganismes et différents parasites peuvent survivre pendant de longues périodes de temps (Juriš *et al.*, 1991, cité par Venglovsky *et al.*, 2005). Le compostage de ces résidus est une façon écologique de les transformer en produits à valeur ajoutée utiles comme produits organiques d'amélioration des sols et engrais (Georgacakis *et al.*, 1996).

Présentement, la nutrition des sols se fait principalement par des engrais minéraux. Cependant, l'appauvrissement des sols en matière organique entraîne une diminution de leur qualité structurale et une perte d'efficacité. Les engrais sont alors utilisés à plus fortes doses au détriment de l'environnement (Leclercy, 2002). Le compost épandu en couche permet d'éviter les phénomènes d'érosion, en jouant un rôle de rétention des particules mises en mouvement par la pluie et en absorbant efficacement les gouttes. La perte de terre par érosion est alors réduite de 40 à 60 %. Étant donné l'amélioration des caractéristiques du sol, ces besoins en apports minéraux sont diminués, puisque le rendement d'efficacité à l'épandage des engrais est augmenté de façon importante. L'humus du compost assure une meilleure efficacité des engrais minéraux et permet d'en utiliser moins (Leclercy, 2002).

Il y a plusieurs méthodes permettant le compostage. Parmi celles-ci, le compostage en andain est le plus commun. La fraction solide issue de divers systèmes de séparation solide-liquide a déjà été compostée avec succès. Certaines règles doivent cependant être respectées pour obtenir un bon compost (tableau 1). Les facteurs principaux d'un environnement optimum pour les processus microbiens dans le compostage sont les suivants : l'oxygénation ou l'aération, la température, l'humidité, le ratio carbone/azote (C/N), le pH et la structure physique.

Tableau 5. Conditions recommandées pour le compostage d'engrais solide

Paramètre	*Conditions recommandées*	
	Gamme raisonnable	*Gamme optimale*
Rapport carbone/azote	20:1 à 40:1	25:1 à 30:1
Humidité (%)	45-65	50-60
Concentrations d'oxygène (%)	> 5	> 5
Dimension particulaire (diamètre - cm)	0,5 - 5,0	0,5 - 2,5
PH	5,5 - 8,0	5,5 - 8,0
Température (°C)	43 - 66	54 - 60

* Source: On-Farm Composting Handbook, 1992

5.1.2 Aération

Une méthode d'aération inadéquate peut rendre le processus de compostage inefficace. Le taux d'aération affecte la chaleur métabolique produite par les micro-organismes aérobies ainsi que l'atteinte et le maintien des températures thermophiles nécessaire au compostage et à la destruction des pathogènes (Lau *et al.*, 1992). Par exemple, des taux élevés d'aération, dans un système d'aération continue, ont un effet de refroidissement nuisible au procédé de compostage.

Pour le compostage d'un biosolide de porcs issu d'une séparation solide-liquide, Lau *et al.* (1992) recommandent un taux d'aération, fourni par intermittence, de 0,04 à 0,08 l min^{-1} kg^{-1} de matière volatile (MV). Ce taux d'aération recommandé est très bas et suggère que l'aération passive est adéquate. D'ailleurs, les données rapportées par Lau *et al.* (1992) étaient semblables à celles du compost témoin qui n'était pas aéré. Cette recommandation d'approvisionnement en oxygène servirait plus au contrôle des odeurs qu'au procédé de compostage en lui-même.

Liao *et al.* (1993) ont composté du biosolide provenant d'un lisier de porcs avec ou sans agent de dilution dans des petits réacteurs. Ces derniers ont mentionné qu'indépendamment de la stratégie d'aération, tous leurs réacteurs de compost ont atteint des températures thermophiles. En effet, ceux n'ayant eu aucune aération sont demeurés dans des conditions thermophiles plus longtemps que les piles aérées. L'aération passive conviendrait donc au compostage de la partie solide obtenu suite à une séparation solide-liquide d'un lisier de porcs avec une presse à rouleaux. Liao *et al.* (1993) et Lau *et al.* (1993) ont employé de la sciure en tant qu'agent de dilution en un rapport massique de 5:1 (fumier:sciure) pour composter du biosolide avec un contenu d'humidité initial de 69 % et de 79 %, respectivement.

D'un autre côté, des essais de conditionnement d'une fraction solide obtenue par centrifugation d'un lisier de porcs ont démontré qu'une aération soutenue permettant l'évacuation de la vapeur d'eau, permet un meilleur compostage qu'une ventilation intermittente ou absente (Martin et Léveillée, 2006). Une ventilation intermittente n'offre pas de meilleurs résultats comparativement à un conditionnement avec aération passive uniquement (aucune ventilation forcée). Dans cette étude, les débits de ventilation ont été ajustés afin de maintenir une concentration en oxygène supérieure ou égale à 5 % dans toutes les strates des piles.

5.1.3 Température

La température du compostage en andain doit être au-dessus de 55°C pour au moins trois jours consécutifs pour des raisons de biosécurité. L'augmentation de la température à l'intérieur des andains résulte de l'activité biologique de la décomposition de la matière organique par les micro-organismes. Par contre, une température excessive réduit la croissance des micro-organismes. Une ventilation forcée permet de contrôler la température à l'intérieur des tas. La température optimale pour le compostage est non seulement spécifique au matériel (lisier et agent structurant), mais elle dépend aussi de la disponibilité d'oxygène qui est affecté par des caractéristiques physiques comme le contenu initial en humidité et le degré de compaction (de Bertoldi *et al.*, 1983). La température du tas de compost ne dépend pas uniquement du taux d'aération mais également de la fréquence et de la durée de l'aération (Lau *et al.*, 1992).

Venglovsky *et al.* (2005) ont effectué des tests de compostage en incluant 1 (S1) ou 2 % (S2) de zéolite naturelle, un minéral ayant des capacités d'adsorption, de catalyse, de déshydratation et de réhydratation, à une fraction solide provenant de tamis vibrant. Aux jours 3 et 5, les températures dans les piles S1 et S2 ont excédé 55°C et sont restées au-dessus de ce niveau pendant 15 jours tandis que la plus haute température enregistrée dans la pile témoin (sans zéolite) pendant l'expérience a été de 29,8°C. La pile témoin n'a donc pas atteint la température minimum requise.

D'un autre côté, dans une étude de Lo *et al.* (1993) avec une fraction solide provenant de la séparation du lisier de porcs à l'aide d'un tamis vibrant, tous les réacteurs ont atteint des conditions thermophiles. Cependant, la pile de compostage dans le réacteur témoin, constituée uniquement de fraction solide, est restée dans une condition thermophile plus longtemps que les piles avec des agents structurants. Les auteurs ont conclu que le biosolide seul a composté aussi bien que le biosolide mélangé avec des agents structurants dû à l'efficacité de la séparation solide-liquide du lisier. En effet, selon eux, la séparation solide-liquide génère des biosolides fibreux homogènes ayant un taux d'humidité inférieur (73,5 à 82,1 %) à celui du lisier de porcs. En outre, la faible densité (500 kg/m³) et la haute porosité (90 %) de tous les mélanges impliquent une distribution d'air uniforme dans les piles de compostage. Cela contribuerait au compostage et atténuerait le besoin d'aération forcée.

5.1.4 Humidité

Le taux d'humidité initial permettant d'assurer un compostage efficace devrait se situer idéalement entre 50 à 60 %, mais des valeurs entre 45 et 65 % seraient tout de même raisonnables (tableau 1). Or, des biosolides de lisier de porc séparés contenant jusqu'à 79 % d'humidité ont été compostés avec succès (Liao *et al.*, 1993). En effet, Liao *et al.* (1993) ont composté avec succès du lisier de porcherie, contenant 79 % d'humidité, avec de la sciure en un rapport massique de 5:1 (fumier:sciure). Selon eux, le compostage est possible avec un contenu d'humidité initial au-dessus de 65 % s'il y a assez d'air dans le compost pour satisfaire les besoins en oxygène des microbes. Les biosolides de lisier séparés doivent simplement être mélangés à un agent de dilution approprié et dans un rapport adéquat.

5.1.5 Les valeurs de pH

Des matières avec un large éventail de pH peuvent être compostées. Toutefois, le pH optimum se situe entre 5,5 et 8,0. En pratique, il est difficile de modifier le pH d'un tas de biosolide de lisier, mais un pH élevé combiné à une haute température en début de processus peuvent conduire à une volatilisation de l'azote sous forme d'ammoniaque (de Bertoldi *et al.*, 1983).

Dans l'étude de Venglovsky *et al.* (2005), le pH dans les tas ayant 1 ou 2 % de zéolite s'est maintenu sous les valeurs des tas témoins sans zéolite durant la majeure partie de la phase thermophile. Selon Venglovsky *et al.* (2005), cela serait relié à l'ammoniaque hydrosoluble et à l'affinité de la zéolite pour les ions ammonium. Les auteurs ont observé une diminution significative du niveau d'azote ammoniacal dans les extraits d'eau provenant des piles ayant 1 ou 2 % de zéolite et entre le 5e et le 35e jour par rapport aux extraits d'eau provenant du tas témoin.

Venglovsky *et al.* (2005) ne recommande donc pas l'utilisation de 2 % de zéolite puisqu'ils n'ont pas observé de différence significative par rapport à une dose de 1 %.

5.1.6 Ratio C/N

Le ratio C/N des différentes fractions solides est plus élevé que celui du lisier brut, cependant il demeure souvent insuffisant pour un compostage rapide et sans émission d'ammoniaque. Si le ratio excède 35, le compostage est ralenti. Si le ratio est inférieur à 20, les pertes d'azote principalement sous forme ammoniacale sont augmentées. Selon Paré *et al.* (1998), le ratio important serait basé sur l'azote et le carbone biodisponible et non sur l'azote et le carbone total.

Liao *et al.* (1993) ont comparé le compostage d'un biosolide issu d'une presse à rouleau et le même biosolide mélangé avec de la sciure de bois dans une proportion massique de 5:1. Les deux piles ont atteint des conditions thermophiles. Les auteurs mentionnent qu'il est possible de composter du biosolide séparé sans addition d'amendement puisque ce matériel a une faible densité et une grande porosité. Toutefois, des acides gras volatils ont été détectés dans la pile de biosolide sans sciure contrairement à celui mélangé avec la sciure de bois. Une accumulation d'acides gras volatils pourrait augmenter la présence d'odeur.

De leur côté, Lau *et al.* (1993) ont mélangé du biosolide séparé avec de la sciure de bois dans deux proportions différentes. Le premier mélange présentait un ratio massique de cinq parties de biosolide pour une partie de sciure (5:1) et présentait un rapport C/N de 38,6. Le deuxième mélange comportait cinq parties de biosolide pour deux parties de sciure (5:2) et le rapport C/N du substrat résultant était de 48,4. Le ratio 5:2 a donné de meilleurs résultats au niveau température et a permis une meilleure aération, ce qui favorise le compostage. Il est à noter que les deux ratios C/N sont au-delà de la marge supérieure considérée comme optimale.

Lo *et al.* (1993) ont quant à eux effectué des essais de compostage avec différents matériaux riches en carbone. Ils ont composté du biosolide sans ajout, avec de la mousse de tourbe et avec de la sciure. Selon leurs résultats, le compost à base de biosolide mélangé avec de la mousse de tourbe était de meilleure qualité en terme de contenu en humidité et en azote, de ratio C/N et de couleur du produit.

Le compostage de la fraction solide des lisiers avec des matériaux riches en carbone résulte en un substrat dont la production d'odeur est stable et transportable plus facilement qu'une forme de fumier liquide (Hoehne *et al.*, 1998). Toutefois, le compostage du fumier avec un matériel riche en carbone exige du travail additionnel et ajoute au poids et au volume de matériel à manipuler. De plus, le marché pour les fractions solides compostées avec des matériaux riches en carbone n'est pas très bien connu.

5.1.7 Utilisation

Une attention particulière doit être portée au contenu en métaux du biosolide puisque la séparation solide-liquide concentre les métaux dans la fraction solide et le compostage engendre une perte d'eau et de volume, ce qui concentre davantage les métaux. Bonazzi et Piccinini (1997) ont composté du biosolide obtenu par centrifugation. Ils l'ont composté seul et avec de la paille

ou du bois déchiqueté. Les produits résultants avaient au moins 1,5 fois plus de cuivre et plus du double de la concentration initiale en zinc. Martin et Léveillé (2006) ont observé la même tendance après le conditionnement des fractions solides provenant également d'une centrifugation.

Dans une étude comparant les rendements de culture du concombre obtenus avec la fertilisation des plants avec une fraction solide fraîche ou compostée, la biomasse aérienne des plants et la récolte de concombres a été plus grande avec la fraction solide compostée (Moral *et al.*, 2005). La taille des concombres était plus petite mais leur nombre était plus élevé.

Lorsque le matériel a un faible ratio C/N, le compostage peut générer des odeurs dues aux émissions d'ammoniac. La biofiltration est une technique de réduction des odeurs du compostage. En effet, la biofiltration consiste à faire passer le courant d'air odorant aux travers d'une couche de matériel filtrant. Le matériel filtrant permet la biodégradation des composantes odorantes capturées. Selon Hong *et al.* (2000), du compost mature de lisier de porcs peut servir comme biofiltre. Il serait intéressant de vérifier la possibilité d'utiliser du compost de fraction solide comme biofiltre lors de processus de compostage ultérieur. Il est probable qu'il soit également nécessaire de déterminer quelles sont les conditions optimales pour obtenir un biofiltre efficace.

5.2 Valorisation aux champs des biosolides

5.2.1 Description générale et considérations agronomiques

L'application aux champs est une excellente voie de recyclage des biosolides. Elle permet de retourner dans les sols des éléments nutritifs et de favoriser la croissance des plantes. C'est une voie peu dispendieuse et l'investissement en capital est généralement faible par rapport aux autres techniques de valorisation. Cependant, l'application étant limitée à certaines périodes de l'année, le biosolide doit être entreposé. Un autre désavantage est celui de l'odeur lors de l'application et de la réaction du public face à cette opération. Les nutriments en excès par rapport aux besoins des plantes peuvent également être lessivés vers les eaux de surfaces. Cependant, respecter les normes agronomiques d'application, maintenir des bandes riveraines et employer des pratiques de conservation du sol limitent les impacts potentiels sur les eaux de surface.

Les biosolides issus d'une séparation solide-liquide sont généralement assez concentrés en éléments fertilisants, peu importe le procédé utilisé. Par conséquent, la valorisation de ces biosolides vise des régions ayant des sols carencés ou des cultures particulièrement exigeantes en phosphore. L'application de la fraction solide sur des terres agricoles est possible mais doit faire l'objet d'un plan agroenvironnemental de fertilisation (PAEF). De plus, l'agronome réalisant le PAEF doit au préalable s'assurer que le produit à valoriser présente une composition et des caractéristiques lui permettant de l'utiliser adéquatement dans le cadre d'un plan de fertilisation (CRAAQ, 2003). Ceci implique une analyse approfondie de la fraction solide issue de la séparation puisque celle-ci retient une grande partie des éléments majeurs et mineurs contenus dans les déjections.

5.2.2 Oligo-éléments

Les éléments traces sont naturellement présents dans les sols en quantités variables. De plus, les lisiers contiennent peu ou très peu d'arsenic, de mercure, de cobalt et de nickel. Ces oligo-éléments ne sont donc pas préoccupants, surtout dans le cadre réglementaire présentement en vigueur (Hébert, 1998). De même, la teneur des fumiers et le cadre réglementaire des activités agricoles sont de nature à limiter les accumulations dans les sols agricoles du Québec à des niveaux d'innocuité pour la santé humaine. De plus, ils ne devraient pas accroître le risque d'accumulation dans l'environnement en cadmium, chrome, molybdène, plomb et sélénium (Hébert, 1998). Ces éléments ne semblent donc pas trop préoccupants, mais il faut toutefois demeurer prudent car le taux d'efficacité de séparation de ces éléments n'est pas connu pour la plupart des systèmes de séparation. Des taux de séparation plus élevés que celui du phosphore, élément à la base des dépôts maximum autorisés, pourraient devenir problématiques. Le tableau 2 présente les teneurs dans le sol à respecter.

Tableau 6. Concentrations maximales recommandées (ppm) de métaux lourds dans les sols, selon la capacité d'échange cationique (CEC)

Capacité d'échange cationique	*Concentration (ppm)*							
	Élément							
	Cu	*Co*	*Hg*	*Cd*	*Cr*	*Zn*	*Pb*	*Ni*
CEC >15	50	34	0,14	2.4	120	160	70	60
CEC <15	25	>17	0,07	1.2	0	80	35	30

Source : Giroux *et al.*, 1992

Une des principales considérations lors de la valorisation aux champs de la fraction solide réside dans la teneur en cuivre et en zinc. Ces éléments sont essentiels pour le développement du porc. Ils jouent un rôle important comme facteur de croissance chez les porcelets et augmentent l'efficacité du système immunitaire. Ces deux métaux sont donc ajoutés en plus grande quantité dans la moulée pour porcs. De ce fait, le lisier de porc est un effluent d'élevage relativement riche en cuivre et en zinc (Hébert, 1998). À long terme et sans suivi, l'utilisation du lisier de porc en vue de la valorisation aux champs peut présenter des risques environnementaux non négligeables. L'accumulation de ces éléments dans les sols par des applications répétitives peut mener à l'atteinte de seuils de toxicité pour les plantes et la microflore du sol (Jondreville *et al.*, 2002; Revy *et al.*, 2003). Cependant, des fortes teneurs en matière organique, des teneurs importantes en argile et un pH élevé réduisent considérablement la toxicité au cuivre (McGrath *et al.*, 1995).

Les apports en cuivre et en zinc dans l'alimentation des porcs tiennent compte des besoins des animaux et de certaines incertitudes tels que la variation dans la composition chimique des ingrédients et de la consommation alimentaire. Par contre, l'ajout supplémentaire de cuivre comme facteur de croissance et de zinc pour son effet anti-diarrhéique chez les porcelets couplé à une faible adsorption de ces éléments par le porc, augmente les rejets dans les déjections produites. Cette pratique génère des lisiers riches en cuivre et en zinc dont l'épandage pourrait entraîner des problèmes d'enrichissement en ces éléments dans les sols. Des essais menés par Tran *et al.* (1996) ont montré que suite à 16 ans d'épandages répétés de lisiers de porcs à des

doses agronomiques de 60 m³/ha, des augmentations dans les sols d'environ 3 mg Cu/kg et de 10 mg Zn/kg de sol par rapport au témoin ont été remarquées. D'autre part, l'augmentation de la teneur en cuivre dans le sol est parfois souhaitable, voire nécessaire en production agricole, car des carences en cuivre sont observées occasionnellement, notamment en production de céréales (Giroux, 1998; cité par Hébert, 1998).

Tiré de Guimont *et al.* (2006), le tableau 7 présente une comparaison de l'impact sur les dépôts de cuivre et de zinc entre l'épandage de lisier brut et la fraction solide, sur des sols pauvres en phosphore et tout en respectant les normes prévues au règlement sur les exploitations agricoles (REA) en 2010 relatives à la gestion du phosphore. La simulation concerne un lisier de porcs à l'engrais et la fraction solide obtenue à partir d'un système de grattes en « V » suite à une séparation solide-liquide de ce même lisier. Le tableau présente donc les excès ou carences (-) en éléments fertilisants suite à la valorisation des effluents d'élevage par rapport aux besoins agronomiques initialement établis. Il est à noter que pour le cuivre et le zinc, le tableau n'indique que l'apport brut en ces éléments par les fertilisants organiques puisqu'il n'existe pas de besoins établis pour les cultures dans les grilles de références utilisées.

Tableau 7. Impact sur les apports en éléments fertilisants de l'application de lisier brut de porc et de la fraction solide issue d'une séparation.

Matériel épandu	Impact sur les apports fertilisants[1]						
	Dose (m³/ha)	N (kg/ha)	P (kg/ha)	K (kg/ha)	Cu (kg/ha)	Zn (kg/ha)	Élément limitant
Lisier brut[2]	30	-67	40	-56	1,56	2,07	P_2O_5
Fraction solide[3]	5,5	-116	3	-100	1,14	1,49	P_2O_5

Source : Guimont *et al.*, 2006
1 : Application sur une prairie de graminées sur sol pauvre en phosphore
2 : Lisier qui aurait été produit si les déjections n'avaient pas été isolées (fractions liquide et solide combinées)
3 : Fraction solide issue d'un système de séparation solide-liquide avec grattes en « v »

Dans ce cas, malgré que les concentrations en cuivre et en zinc dans la fraction solide soient élevées, la dose d'épandage prescrite par le REA limite les dépôts de ces éléments. En effet, puisqu'une forte proportion du phosphore (76 %) provenant des déjections produites se retrouve dans la fraction solide, la dose d'épandage est réduite même en situation de sol pauvre en phosphore. Les dépôts au sol de cuivre et de zinc réalisés dans le cadre de la valorisation de la fraction solide à faible dose sont moins importants que les dépôts provenant de la valorisation d'un lisier brut beaucoup moins concentré. Dans ce cas, le respect des abaques prévus au REA permet donc de limiter les apports en cuivre et zinc. Toutefois, cela pourrait être autrement puisque la composition des fractions solides varie en fonction du lisier brut utilisé et des diverses efficacités d'isolement du système de séparation employé. Une réduction à la source, c'est-à-dire des apports dans l'alimentation, pourrait être envisagée.

Toujours selon la simulation de Guimont *et al.* (2006), malgré une concentration élevée dans la fraction solide des éléments nutritifs tels que l'azote et le potassium, la dose applicable ne permet pas de combler la totalité des besoins de la culture (tableau 7). La concentration en phosphore limite les applications possibles de ce fertilisant et crée des carences importantes en azote et potassium. La valorisation d'une fraction solide obtenue par centrifugation nécessiterait

également une utilisation d'engrais minéraux (N'Dayegamiye et Landry, 2003). Ainsi, les différentes fractions solides devraient permettre de réduire l'utilisation d'engrais minéral.

Selon les scénarios envisagés, une entreprise réceptrice pourrait valoriser ce type de produit sur une parcelle spécifique dans un objectif de redressement rapide de sa fertilité. Cependant, sur une longue période, elle devra songer à disposer le solide en rotation sur plusieurs parcelles afin de bien répartir la charge en phosphore et les oligo-éléments présents dans ce genre de sous-produit.

La dose appliquée au champ pour la fraction solide devrait généralement être faible, puisque ce sont des sous-produits concentrés, comme le démontre bien l'exemple présenté plus tôt avec une dose d'épandage de 5,5 m^3/ha. Cette dose est applicable en utilisant des équipements d'épandage performants et de bonnes conditions de terrain (faible pente). Toutefois, à défaut de pouvoir épandre la dose recommandée, une entreprise peut disposer de la fraction solide en alternance sur plusieurs parcelles.

Selon Dufour *et al.* (2005), le mélange de la fraction solide avec une autre source d'engrais organique peut également s'avérer une alternative intéressante afin de bien balancer la composition de l'amendement organique et de pouvoir effectuer des épandages à dose légèrement plus élevée. L'apport en oligo-éléments pourrait ainsi être limité par la dilution de la fraction solide. De son coté, Goulet (2005) recommande de mélanger la fraction solide à un substrat ayant une siccité plus élevée comme le fumier de volaille lorsque la fraction solide est pâteuse. Ceci faciliterait son épandage. Il faut toutefois tenir compte du fait que le fumier de volaille est riche en phosphore et éviter l'enrichissement des sols.

Un suivi agronomique et environnemental a été effectué pour les divers produits issus d'un lisier séparé par physicochimie et épandu sur une culture d'orge (Moreno 2003, Goulet 2005). La fraction solide a donné des rendements en grains et en paille supérieurs au lisier brut mais son efficacité fertilisante, quoique semblable, fut légèrement inférieure (Goulet, 2005). L'ajout de substrat carboné (sciure ou poussières de sablage) à la fraction solide brute a eu un effet d'immobilisation de l'azote lors de la première année d'application pour les deux mélanges à l'étude. L'effet d'un ajout de substrat carboné à la fraction solide a été étudié car la fraction solide avait un aspect pâteux et était nauséabonde. Les substrats carbonés permettaient, entre autre, d'assécher le matériel, de diminuer les émissions d'odeurs et de faciliter la manutention du matériel. La fraction solide brute avait une teneur en matière sèche de 15,6 % et un ratio C/N de 7,5. La siccité du mélange fraction solide et sciures de bois et du mélange fraction solide et poussières de sablage était respectivement de 28,8 et 22,8 % alors que leur ratio C/N était d'environ 23 pour les mélanges. Les charges recueillies dans des lysimètres par rapport aux charges ajoutées étaient plus faibles pour les fractions solides, même si ces produits avaient un contenu initial plus élevé en azote, phosphore et métaux que le lisier brut (Moreno, 2003). Selon Moreno (2003), les contenus en carbone et en matière organique plus élevés ainsi que la texture plus consistante de ces produits auraient pu limiter leur infiltration dans le profil du sol.

5.2.3 Application d'automne

L'augmentation du rapport C/N du biosolide issu de l'isolement des fractions nécessite également une gestion particulière au champ. Le rapport C/N de la fraction solide étant plus

élevé qu'un lisier brut, la minéralisation de l'azote se fait moins rapidement dans le sol. Des recommandations d'épandage en fin de saison peuvent s'avérer avantageuses, ouvrant une fenêtre d'épandage supplémentaire aux entreprises agricoles sans augmenter le risque environnemental lié à la perte en éléments fertilisants dans l'environnement. De plus, les doses d'épandage de ce produit seront faibles puisqu'il est très concentré. L'application d'automne permet à l'azote de devenir disponible au printemps pour les cultures. Il faut compter une immobilisation momentanée de l'azote par les micro-organismes du sol lorsque ce type d'engrais est incorporé à des résidus de récolte, ce qui contribue à prévenir les pertes d'azote par lessivage et améliorer la structure du sol.

L'apport en matière organique non fibreuse du biosolide est rapidement disponible et s'avère une source d'éléments pour faire croître la biomasse dans le sol. Cette biomasse permet de décomposer les résidus fibreux de cultures qui servent de support physique à la formation d'agrégats, améliorant la structure du sol. Les propriétés des biosolides de séparation sont favorables à la restructuration des sols et au développement de la biomasse tout en ayant un apport en azote et en phosphore intéressant pour des sols carencés. Une attention particulière doit par contre être portée à la gestion de ces solides.

Finalement, par convention, les déjections animales ne sont pas considérées comme des matières résiduelles fertilisantes (MRF), bien que ces matières soient résiduelles et comportent des propriétés d'engrais et d'amendement des sols. Cependant, l'ajout d'intrants (polymères, floculants, etc.) dans certains systèmes de séparation solide-liquide fait généralement perdre aux fractions solides issues de ces systèmes leur statut de fumier, et leur exclusion réglementaire à un CA d'épandage en agriculture. Il existe diverses catégories de qualité environnementale de MRF basées sur leur teneur en contaminants, en organismes pathogènes et en odeur. Plus la MRF est considérée de bonne qualité, moins les contraintes d'utilisation s'appliquent. Toutefois, les fumiers et les lisiers de ferme contiennent souvent des salmonelles ainsi que des quantités très importantes de E. coli (Hébert *et al.*, 2002). L'odeur des fractions solides peut également être très importante, surtout à l'automne, ce qui peut limiter les possibilités de valorisation.

5.3 La production d'énergie à partir des biosolides

5.3.1 Les grandes familles de technologies

L'intérêt d'utiliser les déjections animales comme source d'énergie réside dans le fait que, sur le plan du bilan de carbone, leur utilisation est neutre compte tenu que la nourriture des animaux est produite à partir de la photosynthèse du CO_2 (Chang, 2004). Les déjections animales peuvent donc être considérées comme énergie verte.

De façon générale, il existe deux groupes de technologies reconnues pouvant transformer la biomasse en énergie. Le premier groupe concerne les procédés de décomposition chimique tels que l'incinération et la gazéification alors que le deuxième concerne les procédés de digestion biologique tels que la biométhanisation et la production d'alcool par fermentation (Chang, 2004, Bridgewater et Shand, 1982).

Dans un contexte de valorisation des biosolides de lisier, les procédés de digestion biologique ne semblent pas applicables. En effet, la biométhanisation nécessite un substrat assez liquide afin d'assurer l'absence d'air qui permettrait l'action des microorganismes en anaérobie. Pour que les biosolides puissent être utilisés à cette fin, il faudrait donc les remélanger au liquide duquel ils ont été préalablement séparés. De plus, le ratio C/N du mélange devrait être d'environ 30 pour assurer une production efficace de biogaz. Plus il est faible, plus lente sera la production de gaz. Il semble donc que cette technologie s'applique à des lisiers plutôt qu'à des biosolides obtenus à partir de ces lisiers. Dans le cas de la fermentation alcoolique, ce procédé requiert une quantité suffisante de cellulose pouvant être convertie en sucre et ce ne serait pas le cas avec les biosolides de lisier de porc. Ces deux types de procédés ne seront donc pas traités dans le présent ouvrage.

Les procédés de production d'énergie à partir de la biomasse faisant intervenir une transformation chimique sont appelés procédés de décomposition chimique. Par rapport aux procédés de digestion biologique, ceux-ci auraient l'avantage de permettre de récupérer pratiquement tout le carbone contenu dans la biomasse et de le transformer en énergie (Chang, 2004). Les procédés de décomposition chimiques sont regroupés en deux groupes, soit la simple combustion et la conversion thermochimique.

5.3.2 L'incinération

L'incinération est une réaction chimique où il y a libération de chaleur et de lumière. Ce qui différencie ce procédé de celui de conversion thermochimique est que le produit recherché est principalement la chaleur ou l'électricité et non un sous-produit utilisable ultérieurement tel un gaz ou de l'huile (Bridgewater, 2003). Le produit résultant de l'incinération ne peut donc que difficilement être entreposé. De plus, lorsque la biomasse est utilisée pour produire de l'énergie, l'efficacité moyenne du processus se situerait entre 15 % et 30 % dépendamment des équipements dans lesquels l'incinération est réalisée.

La technologie de combustion de la biomasse est facilement disponible. Elle est utilisée principalement pour traiter des déchets industriels ou provenant d'activités de foresterie et d'agriculture (Bridgewater, 2003). Par contre, l'utilisation de certains types d'appareil à combustion interne tels que les moteurs diesels ou les turbines à gaz ne pourrait se faire directement. De la même façon, les brûleurs conventionnels à l'huile ne pourraient pas non plus brûler de la biomasse directement sans y apporter des modifications majeures (Beenackers *et al.*, 1988).

Dans la littérature, peu d'essais faisant intervenir l'incinération simple du lisier ou de ses biosolides n'ont été répertoriés. L'information réfère à l'incinération de la biomasse en général ou encore à l'incinération de fumier de volaille. L'avantage du fumier de volaille est son fort pourcentage de matière sèche par rapport à celui du lisier ou à celui de ses biosolides, ce qui en fait une matière facilement combustible (Burton et Turner, 2003). L'incinération des biosolides de lisier ne serait pas un procédé économiquement viable du fait que le pourcentage de matière sèche est insuffisant.

Van Ruiten (1998) mentionne que l'incinération du lisier de porc peut se faire lorsque le lisier est suffisamment sec. Le lisier déshydraté pourrait être incinéré dans un four avec lit fluidisé. Cependant, puisqu'il n'y a aucune information précise sur le processus et le produit fini, il est difficile de savoir si le biosolide de lisier peut être valorisé de façon intéressante à l'aide de ce procédé.

5.3.3 La liquéfaction par conversion thermochimique

5.3.3.1 Description

La conversion thermochimique est un processus faisant intervenir de hautes températures et de hautes pressions afin de transformer la biomasse. Les éléments produits les plus courants sont le gaz et l'huile. L'objectif précis de la conversion thermochimique de la biomasse est de transformer un matériel solide composé de carbone, initialement difficile à utiliser sous sa forme première, en un produit ayant des caractéristiques physico-chimiques facilitant son entreposage, son transport au travers de systèmes de pompage et même son utilisation à l'intérieur de systèmes à combustion (Chornet et Overend, 1985).

Habituellement, les déchets ligno-cellulosiques peuvent être convertis en énergie de plusieurs formes en utilisant différents procédés de transformation thermochimique. Le type de procédé dépend du matériel de base et de l'énergie souhaitée. Le lisier et son biosolide contiennent de la lignine et de la cellulose et peuvent donc être qualifiés de matières ligno-cellulosiques (He *et al.*, 1999). De plus, puisque la lignine présente dans le lisier est difficile à décomposer, il semblerait que le processus en soit facilité. Par contre, le fait que la quantité de lignine présente ne soit pas importante fait en sorte que la production d'huile risque d'être moins grande, son contenu énergétique étant associé à la quantité de lignine (He *et al.*, 1999).

La conversion thermochimique comprend des processus tels que la gazéification et la liquéfaction (Demirbas, 1998). Le type de procédé, gazéification ou liquéfaction, dépendrait des conditions présentes lors du processus. Cependant, puisque aucune recherche concernant la production de gaz par conversion thermochimique du lisier ou d'un biosolide provenant du lisier n'a été répertoriée, le présent document ne traitera que de la liquéfaction.

La liquéfaction est un processus chimique au cours duquel se produisent des réactions de dépolymérisation et de réorganisation de la matière organique sous l'action de la chaleur et en absence d'oxygène (Ocfemia *et al.*, 2003). La famille des processus de liquéfaction inclut les processus de pyrolyse et ceux de liquéfaction directe. Ces deux processus sont semblables, sauf que la liquéfaction directe implique l'utilisation d'un catalyseur de réaction.

Le but principal de la liquéfaction est d'accroître le rapport hydrogène sur carbone (H/C) du produit par rapport à l'intrant. Une décroissance du rapport oxygène sur carbone est également nécessaire pour atteindre la forme hydrocarbonée des produits. L'addition de H_2 est donc essentielle afin d'accroître le rapport hydrogène sur carbone et de décroître la présence d'oxygène principalement par la formation du H_2O. L'enlèvement de l'oxygène dans la biomasse se fait également par déshydratation et par décarboxylation (Chornet et Overend, 1985).

La liquéfaction par conversion thermochimique se produit généralement dans un système fermé, ce qui réduit les problèmes de fuite ou de ruissellement associés avec les procédés de traitement en lagune. De plus, elle pourrait réduire la présence d'émissions d'odeur et tous les pathogènes semblent être tués lors du processus thermique (Ocfemia *et al.*, 2003).

5.3.3.2 La température et la pression d'opération

Selon He *et al.* (1999), la température serait un paramètre très important du processus de liquéfaction puisque l'on doit établir, dans le réacteur, un équilibre entre l'eau sous forme de vapeur et sous forme liquide. La vapeur contribue à l'augmentation de la pression et à la production de gaz. La pression d'opération est liée à la température d'opération et varie durant la décomposition du lisier.

Également, les réactions de dépolymérisation de la matière organique ne peuvent survenir si la température n'a pas atteint l'énergie d'activation. Il semble qu'une température de 220°C soit nécessaire pour voir apparaître cette réaction. Cependant, à cette température, la réaction n'est pas complète et une partie de l'intrant demeure intacte (He *et al.*, 1999).

Selon He *et al.* (2000) en utilisant un lisier ayant 27 % de matière sèche et un pH de 6 et en utilisant une pression d'opération de 7 à 18 Mpa, la température d'opération idéale serait située entre 295°C et 305°C. Sous 285°C, il n'y aurait pas de production significative d'huile et des températures supérieures à 335°C produiraient de la carbonisation.

5.3.3.3 Le temps de rétention

La durée du processus est également un paramètre important pour les procédés de liquéfaction. Le temps de rétention affecte le taux de conversion du produit (He *et al.*, 1999). Un temps de rétention insuffisant pourrait conduire à une conversion incomplète. Toutefois, un temps de rétention trop important n'est pas souhaitable puisqu'il augmente le risque de carbonisation du produit.

Selon He *et al.* (2000), le temps de rétention idéal est largement dépendant de la température d'opération. Pour des températures situées aux environs de 300°C et une pression d'opération de 7 à 18 MPa, le temps de rétention optimal serait situé entre 15 et 30 minutes.

5.3.3.4 Les caractéristiques de l'intrant

La quantité de solide dans l'intrant et la grosseur des particules sont des paramètres importants affectant le processus de conversion thermochimique (He *et al.* 1999, Chornet et Overend, 1985, He *et al.* 2001a). Une grande proportion de solides volatils est désirable puisqu'ils se transforment en huile. Cependant, un lisier ayant plus de 25 % de solide est difficile à manipuler par des pompes habituellement utilisées dans ce type de procédé. Un lisier ayant moins de 10 % de solides se pompe plus aisément, mais pourrait être moins intéressant économiquement. Une proportion de 20 % de solides totaux a été choisie lors des expérimentations (He *et al.*, 1999).

Le lisier de porc présente un ratio oxygène sur carbone élevé et un ratio hydrogène sur carbone faible. Cela affecterait négativement l'efficacité de formation de l'huile puisque la présence de d'un contenu élevé en oxygène implique une valeur calorifique plus faible (Zhu, 2006).

Le pH de la matière première semblerait aussi avoir un impact sur la production de l'huile. En effet, un pH de 10 augmenterait la production de 20 % par rapport à un pH de 4 ou de 7 (He *et al.*, 2001b).

Finalement, selon Chornet et Overend (1985), il semble que le mélange de l'intrant avec une certaine quantité d'huile préalablement produite (huile recyclée, solvant ou système aqueux) pourrait améliorer le processus.

5.3.3.5 Le gaz catalyseur

Dans le cas de la liquéfaction directe, l'utilisation d'un catalyseur est requise (He *et al.*, 1999). Dans ce cas, l'utilisation du catalyseur sert plusieurs fonctions, soit celles de la dépolymérisation, l'hydrogénation et la désoxygénation des composés présents dans le lisier (Chornet et Overend, 1985). Le catalyseur utilisé est souvent un gaz réducteur tels que l'hydrogène (H_2), un mélange de H_2 et de monoxyde de carbone (Chornet et Overend, 1985) ou encore du monoxyde de carbone (CO) seul (He *et al.*, 1999).

Dans le cas de l'utilisation de monoxyde de carbone, sa consommation par le processus devient alors un indicateur de la formation de l'huile. Le CO réduit le lisier, éliminant l'oxygène et produisant du gaz carbonique (CO_2). L'ajout de CO améliorerait la conversion du carbone organique en huile et affecterait la proportion d'oxygène dans le produit dépolymérisé, donc la qualité de l'huile produite. Une présence de CO en excès pourrait donc être bénéfique pour le procédé, mais serait économiquement peu intéressante (He *et al.*, 1999).

Dans un essai réalisé par He *et al.* (2001a), il a été déterminé que la qualité de l'huile est meilleure avec l'utilisation de gaz réducteurs tels que le CO ou le H_2 plutôt que l'utilisation de gaz inertes tels que le CO_2, l'azote (N_2) ou de l'air comprimé.

5.3.3.6 Produits résultants

Les produits résultant du processus de liquéfaction sont à la fois des gaz, de l'huile liquide, de l'eau produite par le processus et des solides (He *et al.*, 1999). La proportion de ces éléments varie selon le procédé, mais pourrait s'apparenter à des valeurs de l'ordre de 50 % d'huile, 15 % d'eau et 35 % de gaz et de charbon (Pakdel *et al.*, 1992).

He *et al.* (2001c) a réalisé des analyses de l'huile provenant de plus de 78 échantillons issus d'un processus de liquéfaction à partir de lisier. La composition moyenne de l'huile produite par ce processus serait de 71,1% de carbone; 8,97 % d'hydrogène; 4,12 % d'azote; 0,2 % de souffre et de 3,44 % de cendre. Le contenu en eau de l'huile varierait entre 11,3 et 15,8 % du poids des échantillons. Selon Pakdel *et al.* (1992), l'huile est composée de 5 à 10 % d'hydrocarbures, de 10 à 25 % de composés oxygénés incluant des phénols, aldéhydes, kétones et alcools, de 30 à 45 % de composés hautement polaires et de 15 à 30 % d'eau. Le contenu en carbone et en hydrogène

de l'huile sont des indicateurs importants de la qualité de l'huile produite par liquéfaction (He *et al.*, 1999). Des huiles de haute qualité doivent avoir des contenus en carbone et en hydrogène très élevés et un contenu en oxygène le plus faible possible. L'huile produite par liquéfaction peut également contenir des éléments tels que l'azote, du souffre et certains minéraux (He *et al.*, 1999). Enfin, le pouvoir calorifique de l'huile produite par liquéfaction de plusieurs échantillons de lisier serait de 34760 kJ/kg (He *et al.*, 2001c).

Beenackers *et al.* (1988) affirme qu'il serait possible d'utiliser de l'huile provenant d'une liquéfaction de la biomasse à l'intérieur de moteurs diesels modifiés ou dans des turbines à feu. Cependant, il faut s'assurer que l'huile produite par liquéfaction ait une viscosité semblable à celle des carburants habituels. Cela fait en sorte qu'il est difficile de l'utiliser directement dans les moteurs. Si la viscosité est supérieure à celle désirée, il est possible de transformer l'huile en diesel par transestérification. Le diesel ainsi produit aurait la même viscosité que le carburant diesel conventionnel.

5.3.3.7 Rejets

Le principal gaz résultant de la conversion thermochimique est le CO_2 (He *et al.*, 1999). Des analyses démontrent qu'il n'y a pas de méthane ou d'autre gaz produit lors du processus. Le CO_2 est formé lors de la dépolymérisation et lorsque le groupe carboxyle est séparé thermiquement. Il a été observé que plus de CO_2 et de carbonisation ont été produits lorsqu'il n'y avait pas d'ajout de CO comme agent réducteur.

Le solide rejeté lors du processus représente environ 5 % du poids initial du produit (He *et al.*, 1999). Il contient des éléments inertes tels des poussières et des résidus de carbonisation. Dépendamment des conditions d'opération, la composition du solide pourrait être de 30 à 70 % de solides volatils.

Cependant, une partie du substrat pourrait être réinjectée dans le processus (Bouvier *et al.*, 1982). En effet, si le substrat à utiliser possède un pourcentage de matière sèche trop élevé, il est possible de diminuer ce pourcentage en y ajoutant de l'huile déjà produite. Cependant, si le taux de recyclage est important, ceci aura pour effet de diminuer l'efficacité énergétique et économique du procédé.

5.4 L'enfouissement des biosolides

L'enfouissement des biosolides profondément dans le sol pourrait également être une alternative à l'utilisation des biosolides. Cependant, aucun auteur n'a travaillé directement sur l'impact que pourrait avoir une telle pratique. En effet, les articles répertoriés ne traitent pas de l'enfouissement de biosolides, mais de celui du lisier et, la plupart du temps, le lisier est utilisé dans un but d'amélioration de sol en enfouissement peu profond lors de l'épandage et non dans le but d'en disposer.

Les seuls travaux intéressants traitant d'enfouissement profond sont ceux de Reddell *et al.* (1971), qui a étudié plusieurs moyens d'enfouir du fumier de bovin profondément dans le sol. Les taux d'application alors utilisés étaient de 0, 150, 300 et 450 tonnes de fumier par acre sur

une base sèche et les différents équipements utilisés pour enfouir le fumier permettaient d'enfouir à 460, 686, 762 et 1 270 mm. Le fumier utilisé présentait un taux d'environ 50 % d'humidité et contenait 2,9 % d'azote, 1,6 % de phosphore minéralisable, 2,0 % de K_2O.

Selon les observations faites lors de cette étude, il n'y aurait pas d'impact négatif de cet enfouissement sur la qualité de l'eau souterraine (Reddell *et al.*, 1971). L'enfouissement pourrait donc être une alternative d'utilisation des biosolides de lisier de porc. Cependant, puisque ces travaux datent de plusieurs années, une certaine réserve peut être émise face aux informations citées.

5.5 Le séchage des biosolides

Le séchage du lisier permet généralement de produire une fraction totalement stérile, d'empêcher la dénaturation des protéines et d'assurer un produit homogène (Adamiec 2002, Meiering *et al.* 1975). Le séchage des biosolides de lisier devrait, selon toutes vraisemblances, résulter en un produit ayant les mêmes avantages. Par ailleurs, plus la matière première est sèche, plus le processus est efficace (Burton et Turner, 2003). Cependant, aucune littérature n'a été répertoriée sur le séchage des biosolides de lisier, le séchage ayant été principalement étudié dans la production avicole.

De manière générale, le séchage implique une évaporation de l'eau contenue dans la matière première (Burton et Turner, 2003). Cette opération peut se faire à l'aide d'un échangeur de chaleur conventionnel. Lorsque la matière devient plus solide, il faut alors augmenter son agitation afin de conserver un mouvement de la matière de façon à ce que l'efficacité d'évaporation soit conservée.

Dans une étude portant sur un procédé de traitement de lisier, Cheyrou-Lagreze *et al.* (1999) a évalué un procédé de déshydratation du lisier. Pour commencer, le lisier a été homogénéisé et déposé en fine couche sur les disques du séchoir. Il a ensuite été chauffé à près de 80°C pendant qu'un échangeur assurait le retournement des sédiments. Pendant le processus, les mousses produites ont été résorbées et les gaz ont été acheminés vers un système d'épuration. Le lisier a ensuite été déshydraté rapidement en fines couches. Finalement, les vapeurs ont été épurées à l'aide de douche et elles ont été compressées à nouveau de façon à ce que le procédé soit viable économiquement. Le processus a conduit à la fabrication d'une poudre contenant 4 % d'azote, 2,5 % de phosphore et 2,5 % de potassium. L'eau produite était stérile et ne contenait aucune matière en suspension, de nitrate, de potassium ou encore de potassium. La demande chimique en oxygène (DCO) de 120 mg/L en fait une eau rejetable dans la nature. Cependant les résultats de l'analyse des lisiers séchés n'ont pas été diffusés.

Le processus de séchage peut nécessiter un biofiltre à la sortie des gaz afin de minimiser les émissions d'ammoniac. Selon Meiering *et al.* (1975), les gaz qui s'échappent du procédé doivent être collectés et rebrûlés à une température de plus de 650°C afin d'éliminer des éléments nuisibles tels que les mercaptans, le scatol, la matière putrescible et la poussière organique.

D'autres auteurs ont réalisé des essais de séchage avec du fumier de volaille. Toutefois, le procédé de séchage de fumier de volaille inclut souvent la litière sur laquelle ont été élevées les

poules. Ce substrat est très différent des biosolides de lisier. Les procédés évalués sont les tambours rotatifs avec hautes températures (Meiering *et al.*, 1975), séchoir avec lit fluidisé (Zering, 2006) ou encore le séchage passif à l'aide de la ventilation provenant du bâtiment d'élevage (SECONOV, 2006).

5.6 La granulation des biosolides

La granulation est une des méthodes de valorisation efficace des matériaux biologiques et agricoles (McMullen *et al.*, 2004). Cependant, la matière utilisée pour produire des granules doit être sèche. Dans le cas de biosolides de lisier, ceci pourrait impliquer un séchage supplémentaire ou encore l'ajout d'un autre ingrédient ayant un très faible taux d'humidité. Puisque la granulation d'une matière première est basée sur ses caractéristiques physiques, il est donc possible de s'inspirer de la granulation d'autres éléments semblables aux biosolides de lisier.

Certaines technologies telle que celle proposée par Swiss Combie Technology AG existent afin de produire des granules à partir de biosolides provenant de municipalités (Gies, 1995). Dans ce cas, le pourcentage de matière sèche utilisé doit être de plus de 50 %. Un convoyeur à vis est utilisé pour acheminer les biosolides vers un tambour muni de palettes. À l'aide de la seule action de rotation de ces palettes et de l'air chaud, il se forme des granules. Ces granules sont ensuite séparés par grosseur, les grossières, les moyennes et les fines. Seules les particules de grosseur moyenne, de deux à quatre millimètres, sont désirées. Les granules peuvent enfin être refroidis avant d'être acheminés vers l'entreposage. Les granules ne présentant pas les caractéristiques voulues sont traités de nouveau en mélange avec la matière première.

Dans un essai, McMullen *et al.* (2004) a procédé à la fabrication de granules de litière de poulet. Les granules ont été fabriqués dans une moulange. Le processus débute par un chauffage de la litière à 75°C par l'injection de vapeur. Dû à la haute concentration de minéraux dans la litière, 3 % d'huile végétale y a été ajouté afin de lubrifier l'appareil. Après le processus, les granules ont été refroidis dans une chambre à 22°C. Les granules résultants auraient 40 % de matière sèche. Par contre, aucune donnée ne permet de connaître le taux de matière sèche de la matière première.

Dernièrement, des chercheurs universitaires du Québec ont travaillé à mettre au point des engrais granulaires à base de biosolides de lisier de porcs. Ces granules sont fabriqués à partir de biosolides provenant de divers systèmes de traitement des lisiers tels que Biofertile F et Lisox auquel il y a ajout de phosphate mono-ammoniacal. Cet ajout correspond environ à 1 partie pour 2 à 3 parties de biosolide. Selon ces chercheurs, les engrais à base de biosolides possèdent plusieurs avantages dont le principal serait de recycler les solides de fumier en plus de favoriser le rendement des cultures. En effet, ces engrais ont été appliqués sur des cultures maraîchères avec des résultats intéressants (Parent, 2006b).

6 Analyse et discussion

À l'aide des critères d'évaluation choisis pour l'analyse, les différentes filières ont pu être comparées. Cependant, puisque ces filières ne sont pas toutes au même stade de développement, elles ont été séparées en trois catégories, soit les filières à l'étape de l'application, celles à l'étape du développement et enfin, celles qui nécessitent encore de la recherche avant d'être utilisées. Les résultats obtenus par les différentes filières sont présentés au tableau 8.

Tableau 8. Évaluation des filières de valorisation des biosolides de lisier de porc*

Stade de développement	*Application*			*Développement*		*Recherche*
Filière de valorisation	*Compostage*		*Séchage*	*Granulation*	*Incinération*	*Liquéfaction*
	Passif	*Actif*				
Critères environnementaux (25,0 %)						
Pollution de l'air	2	2	1	1	3	4
Pollution de l'eau	3	3	4	4	4	4
Besoins en énergie non renouvelable	3	2	2	1	1	1
Moyenne	*2,67*	*2,33*	*2,33*	*2,00*	*2,67*	*3,00*
Critères sociaux ou reliés à la santé (20 %)						
Impact sur l'odeur	3	3	4	5	5	5
Impact sur les pathogènes	3	3	4	4	5	5
Moyenne	*3,00*	*3,00*	*4,00*	*4,50*	*5,00*	*5,00*
Critères techniques (15 %)						
Adaptabilité à la gestion actuelle à la ferme	4	4	3	1	1	1
Disponibilité des équipements et infrastructures	4	4	3	1	2	1
Disponibilité des intrants	2	2	5	3	5	3
Besoins du support technique/complexité	4	4	3	1	2	1
Adaptabilité à la variation de la charge à traiter	5	5	5	2	4	1
Moyenne	*3,80*	*3,80*	*3,80*	*1,60*	*2,80*	*1,40*
Critères économiques (15 %)						
Sensibilité aux coûts de la main-d'œuvre	3	3	2	2	1	1
Sensibilité aux coûts des intrants	3	3	2	2	1	1
Sensibilité aux coûts entretien	4	3	2	1	1	1
Moyenne	*3,33*	*3,00*	*2,00*	*1,67*	*1,00*	*1,00*
Critères concernant le sous-produit (25 %)						
Besoins en intrants exogènes	3	3	5	3	5	4
Amélioration des conditions de manutention des produits	4	4	4	5	5	5
Marché pour les sous-produits	2	2	2	4	2	5
Moyenne	*3,00*	*3,00*	*3,66*	*4,00*	*4,00*	*4,66*
Moyenne globale	*3,09*	*2,95*	*3,17*	*2,89*	*3,24*	*3,28*

* : Les notes varient de 1 à 5, 1 étant la note la plus faible et 5 étant la note la plus haute.

Selon l'analyse effectuée (tableau 8), la filière applicable dans l'immédiat et la plus prometteuse serait le séchage. Un des points forts de cette filière est la fabrication d'un sous-produit très intéressant et utilisable dans un secteur non-agricole. De plus, le séchage produirait moins d'odeurs et de pathogènes que les autres filières auxquelles il se compare, soit le compostage passif ou actif. De ces deux types de compostage, la méthode passive devrait être privilégiée puisque celle-ci requiert moins d'énergie et semble moins sensible aux coûts d'entretien.

La granulation et l'incinération font partie de la catégorie des techniques au stade de développement au Québec. L'avantage de l'incinération est d'être une technologie plus propre que la granulation quant à la qualité de l'air vu le plus grand contrôle des gaz d'échappement. De plus, elle ne nécessite pas l'ajout d'intrant et il est plus facile de l'utiliser avec des charges variables. En effet, pour que la granulation soit efficace, cela nécessite un substrat plus homogène en concentration et en matière sèche que pour l'incinération.

Une seule technologie au stade recherche a été analysée et par conséquent ne peut être comparée à une autre au même stade. Toutes filières confondues, la liquéfaction en biocarburant est la plus intéressante. Bien que demandant de forts investissements, elle permet d'obtenir un sous-produit dont la valeur est plus grande que toutes les autres filières en plus d'avoir des impacts environnementaux et sur la santé de la population très limités et de montrer une ouverture à des marchés non limités. Cependant, elle n'est pas encore disponible commercialement et nécessite encore de la recherche pour mettre au point des équipements permettant de suivre cette voie.

Lorsque ce projet a été lancé, le groupe de travail s'attendait à obtenir de la littérature suffisamment de données détaillées pour permettre l'établissement de bilans environnementaux, techniques et économiques des filières de valorisation. De tels bilans des technologies ciblées par la première sélection faite à base de critères de la FPPQ auraient permis de trier de façon plus concrète les technologies sur lesquelles orienter les projets de recherche future. La valorisation des solides issus de la séparation de phases est donc un domaine émergent peu documenté.

Afin d'obtenir des coûts d'implantation et d'opération des technologies de séparation, un appel aux promoteurs fut lancé pour qu'ils fournissent les données requises. Quelques promoteurs n'ont pas accepté de donner des coûts d'investissement et des frais d'opération annuels. Quelques autres promoteurs n'ont pas fourni de données complètes rendant la compilation et l'analyse de ces technologies non valables scientifiquement. Quelques promoteurs ont également remis des données complètes mais divergentes d'informations déjà publiées. Par conséquent, il ne fut pas possible de présenter un tableau des coûts dans le présent rapport.

Parmi les prochains travaux envisageables dans ce secteur, deux sont à prioriser soit :

- l'implantation et le suivi des procédés de traitement et de leurs effluents à l'échelle de la ferme;
- la réalisation de projets de recherche appliqués sur la filière de la liquéfaction des biosolides.

7 Conclusion

L'objectif général de ce projet consistait à effectuer une revue de littérature au sujet de différentes filières, au niveau mondial, de valorisation de la phase solide résultant de la séparation solide-liquide des lisiers. Les objectifs spécifiques étaient les suivants :

- Déterminer et compiler les caractéristiques des biosolides résultant de différents systèmes de séparation ou de traitement du lisier disponibles commercialement au Québec;
- Réaliser l'inventaire des alternatives de valorisation des biosolides issus des systèmes de séparation ou de traitement existant actuellement au Québec et à travers le monde;
- Cibler les technologies de valorisation des biosolides disponibles ou facilement adaptables au contexte et conditions du Québec;
- Procéder à l'évaluation environnementale, technique et économique initiale des filières de valorisation des biosolides adaptables au contexte québécois dans le cadre d'une agriculture durable;
- Identifier les futures filières possibles de valorisation des biosolides résultant de la séparation ou d'un traitement des lisiers démontrant un fort potentiel d'implantation au Québec en vue d'orienter les efforts de recherche dans le domaine.

Pour atteindre ces objectifs, plusieurs travaux ont été réalisés. Dans un premier temps, une compilation des caractéristiques des biosolides issus des systèmes de traitement fournie par les promoteurs de technologies de séparation a été réalisée. En général, ces fractions solides ont une teneur en matière sèche variant de 7 à 28 % pour des concentrations variant de 4 500 à 11 361 mg/kg et de 760 à 7 600 mg/kg pour les concentrations en azote totale et en phosphore respectivement.

Actuellement, l'utilisation habituelle des biosolides est l'épandage dans les champs à l'aide d'un épandeur à fumier solide. Cependant, il existe déjà quelques alternatives à l'épandage. Ces alternatives vont du compostage à la granulation en passant par le séchage. En plus des plusieurs lieux de compostage reconnus, les installations répertoriées au Québec sont les suivantes :

- Acti-sol (granulation de fumier de poules pondeuses);
- Agregat Waterloo (granulation à grande échelle, divers substrats);
- Poudrex (bouletage à petite échelle, divers substrats);
- Thermalco (incinération de fumier de poulet);

Cependant, ces installations ne sont pas dédiées à la valorisation de biosolides de lisier de porcs et nécessitent probablement une certaine adaptation aux caractéristiques des biosolides avant de pourvoir les accueillir.

Dans un troisième temps, une recherche bibliographique exhaustive des alternatives mondiales de valorisation des biosolides issus des séparateurs de phases ou de traitement a été faite. Cette recherche couvrait autant les technologies commerciales qu'en développement ou encore à l'état de la recherche. Cinq catégories de technologies ont été ciblées, soit le compostage, le séchage, la granulation, l'incinération et la production d'énergie par liquéfaction.

Finalement, à l'aide d'une approche adaptée pour le projet, un comité a procédé à l'évaluation environnementale, technique et économique initiale des filières de valorisation des biosolides adaptables au contexte québécois dans le cadre d'une agriculture durable. Cette approche est inspirée de celle du comité transfert technologique de la Fédération des producteurs de porcs du Québec. Les résultats de cette analyse critique démontrent qu'il serait globalement avantageux de transformer les biosolides en énergie. En effet, la filière de la liquéfaction du biosolide, bien que jugée à priori comme étant complexe et nécessitant beaucoup d'investissement, est celle qui a été jugée la plus prometteuse. Cependant, afin de réduire les coûts et d'améliorer la compréhension des procédés, cette filière aura besoin d'importants efforts de recherche avant d'être disponible pour les producteurs aux prises avec des biosolides à traiter.

8 Références

Adamiec, J. 2002. Drying of waste sludges in a fluidized bed dryer with a mixer. Drying technology. 20 (4&5) : 839-853.

Beenackers, A.A.C.M, A.V. Bridgwater, W.P.M. Swaaij. 1988. Status and opportunities for thermochemical biomass conversion in the European Community. Energy from biomass 4; Proceedings of the third contractors' meeting, Paestum, 25-27 mai 1988.18-24.

Bhamidimarri, S.M.R., S.P. Pandey. 1996. Aerobic thermophilic composting of piggery solid wastes. Wat. Sci. Tech. 33(8) : 89-94.

Bonazzi, G., S. Piccinini. 1998. Manure surplus processing at the farm level and in coordinated groups of farms. Integrated bio-Systems in zero emissions applications. Proceeding of the internet conference on integrated Bio-systems. [en ligne] http://www.ias.unu.edu/proceedings/icibs/bonazzi/paper.htm.

Bouvier, J.M., M. Gelus, P.Y. May et F. Roux. 1982. Etude de l'autohydrolyse du bois, comme prétraitement avant la liquéfaction directe. Energy from Biomass, 2nd E.C. Conference. Applied Science Publishers. 906-908.

Bridgewater, A.V. 2003. Renewable fuels and chemicals by thermal processing of biomass. Chemical engineering journal. 91 : 87-102.

Bridgewater, A.V., R.N. Shand. 1982. Process simulation for optimisation of fuel production by themochemical processing of biomass. Energy from biomass, 2nd E.C. Conference. Applied Science Publishers. 955-961.

Burton, C.H., C. Turner. 2003. Manure management, Treatement strategies for sustainable agriculture. Silsoe research institute, Wrest Park, Silsoe, Bedford, UK. 411 pages.

Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ). 2003. Guide de référence en fertilisation.1ère éd. Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec, Ste Foy, Québec. 294 pages.

Chang, F. 2004. Energy and sustainability comparisons of anaerobic digestion and thermal technologies for processing animal wastes. ASAE Annual Meeting, Ottawa, Ontario, Canada, 1-4 août 2003. Paper #034124.

Cheyrou-Lagreze, A., J. Bourdel, P. Magaldi. 1999. Procédé de traitement des déjections animales. Comptes rendus de l'Académie de l'Agriculture de France. 85(3) : 61-67.

Chornet, E., R.P. Overend. 1985. Biomass liquefaction: an overview. In Fundamentals of thermochemical biomass conversion. eds. R. P. Overend, T. A.

Demirbas, A. 1998. Yield of oil products from thermochemical biomass conversion processes. Energy Convers. Mgmt. 39(7) : 686-690.

de Bertoldi, M., G. Vallini, A. Pera. 1983. The biology of composting : a review. Waste Management & Research. 1 : 157-176.

Dufour, V., F. Pouliot, B. Leclerc, S. Godbout, L.A. Larose, M. Trahan. 2005. Évaluation technique et économique d'un système d'isolement des fèces avec courroies sous les lattes dans un bâtiment porcin commercial québécois. Centre de développement du porc. Ste-Foy, Qc, Canada. 68 pages.

Georgacakis, D., A. Tsavdaris, J. Bakouli, S. Symeonidis. 1996. Composting solid swine manure and lignite mixtures with selected plant residues. Bioresource Technology. 56 : 195-200.

Gies, G. 1995. Beneficial use of biosolids expands in Canada. Biocycle. 36(3): 79-83.

Giroux, M., M. Rompré, D. Carrier, P., M.Lemieux. 1992. Caractérisation de la teneur en métaux lourds totaux et disponibles des sols du Québec. Agrosol V (2) : 46-55.

Goulet, M. 2005. Suivi agronomique de sous-produits fertilisants issus d'un procédé de traitement de lisier de porc. Mémoire de maîtrise. INRS-Eau, Terre et Environnement, Institut national de la recherche scientifique, Université du Québec, Sainte-Foy (Québec), 174 pages.

Guimont, H, V. Dufour, F. Pelletier, F. Pouliot, A. Coulibaly, S. Godbout, S. Lemay, C. Giguère, D. Massé. 2006. Évaluation technique et économique d'un système d'isolement des fèces avec grattes en « V » dans un engraissement commercial. Centre de développement du porc du Québec. Non publié.

He, B.J., Y. Zhang, Y. Yin, T.L. Funk, G.L. Riskowski. 2000. Operating temperature and retention time effects on the themochemical conversion process of swine manure. Transactions of the ASAE. 43(6) : 1821-1825.

He, B.J., Y. Zhang, Y. Yin, G.L. Riskowski, T.L. Funk. 1999. Thermochemical conversion of swine manure: a process to reduce waste and produce liquid fuel. ASAE Annual Meeting, Toronto, Ontario, Canada, 18-21 juillet 1999. Paper #994062.

He, B.J., Y. Zhang, Y. Yin, T.L. Funk, G.L. Riskowski. 2001a. Effects of alternative process gases on the thermochemical conversion process of swine manure. Transactions of the ASAE. 44(6) : 1873-1880.

He, B.J., Y. Zhang, Y. Yin, T.L. Funk, G.L. Riskowski. 2001b. Effects of feedstock pH, CO addition, and total solid content on the thermochemical conversion process of swine manure. Transactions of the ASAE. 44(3) : 697-701.

He, B.J., Y. Zhang, Y. Yin, T.L. Funk, G.L. Riskowski. 2001c. Premilary characterization of raw oil products from the thermochemical conversion process of swine manure. Transactions of the ASAE. 44(6) : 1865-1871.

Hébert, M. 1998. Contamination des sols agricoles du Québec par les éléments-traces : situation actuelle et perspectives. Agrosol X : 87-93.

Hébert, M., E. Gagnon, V. Rioux. 2002. Contrôle de qualité indépendant des matières résiduelles fertilisantes par le MENV – Partie 2 : pathogènes et paramètres agronomiques. [en ligne] http://www.mddep.gouv.qc.ca/matieres/articles/controle-partie2.htm.

Hoehne, J., C.Fulhage et S.Banerji.1998.Composting separated swine manure solids.ASAE Annual International Meeting.Orlando, Floride.

Hong, J.H., D.L. Elwell, H.M. Keener. 2000. Biofiltration using partially stabilized hog manure compost. ASAE Annual international meeting. 12 pages.

Jondreville, C., P.S. Revy, A. Jaffrezic, J.Y. Dourmad. 2002. Le cuivre dans l'alimentation du porc : oligo-élément essentiel et risque potentiel pour l'environnement. INRA Prod. Anim. 15(4) : 247-265.

Larouche, J.P., Y. Martineau, F. Pelletier, F. Leveillée. 2005. Évaluation du procédé de traitement du lisier Sequencia. [en ligne] http://www.mapaq.gouv.qc.ca/NR/rdonlyres/A5EB5B72-6211-494E-B6FD-99AF10A5BA13/0/Rapportfinal703024.pdf

Lau, A.K., P.H. Liao, K.V. Lo. 1993. Evaluation of swine waste composting in vertical reactors. J.Environ. Sci. Health. 28(4) : 761-777.

Lau, A.K., K.V. Lo, P.H. Liao, J.C. Yu. 1992. Aeration experiments for swine waste composting. Bioresource Technology. 41 : 145-152.

Leclercy, D. 2002. Le compost. Une filière de valorisation des déchets organiques à développer. Courrier de l'environnement de l'INRA. n°47, octobre. 125-134.

Liao, P.H., A.T. Vizcarra, A. Chen, K.V. Lo. 1993. Composting of separated solid swine manure. J. Environ. Sci. Health. A 28(9) : 1889-1901.

Lo, K.V., A.K. Lau, P.H. Liao. 1993. Composting of separated solid swine wastes. J. agric. Engng. Res. 54 : 307-317.

Martin, D.Y., F. Léveillée. 2006. Installation et essais à la ferme d'un système de séparation solide-liquide du lisier de porcs complémenté par la stabilisation et l'entreposage de la fraction solide. Rapport préliminaire. 97 pages.

McGrath, S. P., Chaudri, A. M. and Giller, K. E. 1995. Long-term effects of metals in sewage sludge on soils, microorganisms and plants. Journal of Industrial Microbiology, 14 : 94-104.

McMullen, J., O. Fasina, W. Wood, Y. Feng, G. Mills. 2004. Physical characteristics of pellets from poultry litter. ASAE/CSAE Annual Meeting, Ottawa, Ontario, Canada. 1-4 Août. Paper #046005.

Meiering, A.G., F.B. Hesse, L.A. Rudgers, J. Walker. 1975. High-temperature drying of animal waste. Canadian Agricultural Engineering. 17(2) : 75-80.

Moral, R., J. Moreno-Caselles, M.D. Perez-Murcia, A. Perez-Espinosa, C. Paredes, F. Sosa. 2005. The influence of fresh and composted solid fractions of swine manure slurry on yield of cucumber (Cucumis sativus L.). Communications in soil science and plant analysis. 36 : 517-524.

Moreno, A.N. 2003. Étude à l'aide de lysimètre drainants de la qualité de l'eau du sol suite à l'épandage de sous-produits de lisier traité. Mémoire de maîtrise. INRS-Eau, Terre et Environnement, Institut national de la recherche scientifique, Université du Québec, Sainte-Foy (Québec), 116 pages.

N'Dayegamiye, A., C. Landry. 2003. Valorisation agricole des sous-produits de lisier séparé. Dans : Colloque en agroenvironnement IRDA 2003. La gestion des engrais organiques dans les régions de fortes concentrations animales. Faire mieux au moindre impact! Drummondville, 13 nov.47-57.

Ocfemia, K.C.S., Y. Zhang, T. Funk. 2003. Continous Thermochemical Conversion process to produce oil from swine manure. ASAE Annual Meeting, Las Vegas, Nevada, USA. 27-30 juillet 2003. Paper #034124.

Pakdel, H., H.G. Zhang, C. Roy. 1992. Detailed chemical characterization of biomass pyrolysis oils, polar fractions. Advenced in Thermonuclear Biomass Conversion – Vol. 2. Edited

and reviewed papers from an international conference held in Interlaken, Switzerland, 11-15 may 1992. 1068-1083.

Paré, T., H. Dinel, M. Schnitzzer, S. Dumontet. 1998. Transformations of carbon and nitrogen during composting of animal manure and shredded paper. Biol.Fertil.Soils. 26 : 173-178.

Parent, L.E. 2006a. Qualité des boues de lisier de porc pour la fabrication d'engrais granulaire. [en ligne] http://www.mapaq.gouv.qc.ca/NR/rdonlyres/D4414614-6775-43E0-A7F0-83D7CE7A4BFF/0/Rapportfinal603015.pdf

Parent, L.E. 2006b. Engrais granulaires à base de boues (biosolides) de lisier de porcs pour les cultures maraîchaires : nouveaux débouchés. [en ligne] http://www.agrireseau.qc.ca/ agroenvironnement/documents/603025.pdf

Reddell, D., W.H. Johnson, P.J. Lyerly, P. Hobgood. 1971. Disposal of beef manure by deep plowing. Livestock Waste Management. ASAE, St.Joseph, Michigan. 235-238.

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.

SECONOV, 2006. Un système de séchage pour fumier de volaille. [en ligne] http://www.seconov.ca.

Tran, T.S., D. Côté, A. N'Dayegamiye. 1996. Effets des apports prolongés de fumier et de lisier sur l'évolution des teneurs du sol en éléments nutritifs majeurs et mineurs. Agrosol. IX (1) : 21-30.

Venglovsky, J., N. Sasakova, M. Vargova, Z. Pacajova, I. Placha, M. Petrovsky, D. Harichova. 2005. Evolution of temperature and chemical parameteres during composting of the pig slurry solid fraction amended with natural zeolite. Bioressource Technology. 96 : 181-189.

Van Ruiten. 1998. Phosphate recovery from animal manure, the possibilities in the netherlands. [en ligne] http://www.nhm.ac.uk/research-curation/projects/phosphaterecovery/ VanRuiten.pdf.

Zering, K. 2006. Best Idaho centralized fluidized bed combustion facility. Technology Report. North Carolina State University, Raleigh, NC, 20 janvier 2006, 18 pages.

Zhu, J. 2006. Hydrogen production could come through swine manure. [en ligne] http://webstar.postbulletin.com/agrinews/210481601347732.bsp