



RAPPORT FINAL

Évaluation de l'efficacité fertilisante en N et P, et de l'ISB de la fraction solide de lisier de porcs conditionnée obtenue du séparateur décanteur centrifuge afin d'en déterminer la valeur économique

DS 6186

Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA)

Mars 2007-2010

Rédigé par Christine P. Landry, chercheure, biologiste, agr., Ph.D. – IRDA

Avec la collaboration de

Patrick Dubé, chimiste, Ph.D. - IRDA
Julie Mainguy, attachée de recherche, agr. - IRDA
Danièle Pagé, tech. agricole - IRDA
Daniel Yves Martin, ing., M.Sc. - IRDA

Janvier 2011

TABLES DES MATIÈRES

1. DESCRIPTION DU PROJET	9
1.1 Introduction	9
1.2 Objectif général	12
1.3 Objectifs spécifiques	12
1.4 Atteinte des objectifs	12
2. MATÉRIEL ET MÉTHODE	14
2.1 Mise en place de l'expérience	14
2.2 Dispositif expérimental et traitements	14
2.3 Caractérisation de la fraction solide de lisier de porcs	15
2.4 Nutrition, développement et rendement des plants	18
2.5 Analyses chimiques et biologiques des sols	20
2.6 Analyses statistiques	21
3. RÉSULTATS ET DISCUSSION	21
3.1 Effectuer la caractérisation biochimique de la FSLP _c sur la base de ses contenus en nutriments majeurs et mineurs, en carbone et en éléments traces métalliques.	21
3.1.1 <i>Nutriments majeurs et mineurs</i>	21
3.1.2 <i>Éléments traces métalliques</i>	28
3.1.3 <i>Agents pathogènes</i>	32
3.2 Évaluer l'impact de l'ajout de FSLP _c au sol en relation avec la nutrition et le développement des parties aériennes des plants en cours de saison, et le rendement en tubercules à la récolte.	34
3.2.1 <i>Développement et nutrition azotée des plants en cours de saison</i>	34
3.2.2 <i>Développement et nutrition phosphatée des plants en cours de saison</i>	37
3.2.3 <i>Rendements et qualité des tubercules</i>	41
3.2.4 <i>Contenus en ÉTMs et nitrates</i>	44
3.3 Évaluer l'impact de l'utilisation de FSLP _c sur les pools labiles de C, N et P du sol, de même que sur son taux d'activité biologique en cours de saison.	48
3.3.1 <i>Contenus en C, N et P labiles du sol</i>	48
3.3.2 <i>Activités enzymatiques et potentiel métabolique du sol</i>	54

3.4	Évaluer l'impact de l'utilisation de FSLP _c sur les paramètres agronomiques, de même que sur les contenus en éléments traces métalliques et en <i>E. coli</i> du sol à la récolte.	58
3.4.1	<i>État des paramètres agronomiques du sol à la récolte</i>	58
3.4.2	<i>Contenus en ÉTMs, E. coli et nitrates résiduels du sol à la récolte</i>	62
3.5	Évaluer les coefficients d'efficacité fertilisante (CE) de N et P de la FSLP _c afin de permettre le calcul des doses à épandre en fonction des besoins des plantes dans le but de réduire l'emploi des engrais de synthèse et de proposer une voie économiquement rentable et durable de valorisation des surplus de lisier.	65
3.5.1	<i>Efficacité fertilisante de l'azote de la FSLP_c</i>	66
3.5.2	<i>Efficacité fertilisante du phosphore de la FSLP_c</i>	69
3.5.3	<i>Valeur économique</i>	72
3.6	Effectuer le transfert de connaissances entre le laboratoire de SGA (Sols et génie agroalimentaire) l'Université Laval et le laboratoire de l'IRDA afin de rendre accessible à l'industrie et aux producteurs la méthodologie permettant de calculer l'indice de stabilité biologique (ISB).	74
3.7	Caractériser la FSLP _c sur la base de l'ISB afin de pouvoir ultérieurement la comparer aux divers amendements organiques utilisés en agriculture.	74
4.	DIFFUSION DES RÉSULTATS	79
5.	CONCLUSION	80
6.	HISTOIRE D'UNE RÉUSSITE	84
7.	RÉFÉRENCES	85

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1	Étapes constituant la méthode de dosage de l'ISB.	16
Tableau 2	Caractéristiques agronomiques du lisier de porcs et de la FSLP _c en base humide telle qu'épandue au champ en 2007 et 2008.	22
Tableau 3	Caractéristiques agronomiques (b.s.) du lisier de porcs et de la FSLP _c utilisée en 2007 et 2008.	23
Tableau 4	Ratios des critères agronomiques du lisier brut et de la FSLP _c utilisée en 2007 et 2008.	23
Tableau 5	Relation entre le rapport C/N des résidus organiques, la minéralisation et la disponibilité de l'azote pour les plantes.	23
Tableau 6	Coefficient d'efficacité de l'azote total (CE) et de la fraction organique (CEFO) des engrais de ferme en 1 ^{ère} année selon leur rapport C/N	24
Tableau 7	Comparaison des propriétés agronomiques (b.s.) de divers produits organiques.	26
Tableau 8	Comparaison des propriétés agronomiques (b.s.) de diverses fractions solides de lisier de porcs.	27
Tableau 9	Composition (b.s.) en ÉTMs du lisier brut et de la FSLP _c épandue au champ en 2007 et 2008.	28
Tableau 10	Concentration (b.s.) en ÉTMs de divers engrais minéraux commerciaux.	29
Tableau 11	Teneurs limites (b.s.) en ÉTMs des MRFs.	30
Tableau 12	Composition et ratios en ÉTMs du lisier de porcs brut et de la FSLP _c en base humide telle qu'épandue au champ en 2007 et 2008.	30
Tableau 13	Composition (b.s.) en ÉTMs de divers produits organiques.	31
Tableau 14	Composition (b.s.) en ÉTMs de diverses FS de lisier de porcs.	32
Tableau 15	Impact de l'ajout de FSLP _c comme engrais azoté sur le développement et la nutrition en N des plants (b.s.) en cours de saison, étés 2007 et 2008.	35
Tableau 16	Analyses statistiques de l'impact de l'ajout de FSLP _c comme engrais azoté sur le développement et la nutrition en N des plants (b.s.) en cours de saison, étés 2007 et 2008.	35
Tableau 17	Coefficients d'utilisation apparente et efficacité fertilisante du N de la FSLP _c aux stades boutons et floraison, étés 2007 et 2008.	36
Tableau 18	Impact de l'ajout de FSLP _c comme engrais phosphaté sur le développement et la nutrition en P des plants (b.s.) en cours de saison, étés 2007 et 2008.	38
Tableau 19	Analyses statistiques de l'impact de l'ajout de FSLP _c comme engrais phosphaté sur le développement et la nutrition en P des plants (b.s.) en cours de saison, étés 2007 et 2008.	38

Tableau 20	Coefficients d'utilisation apparente et efficacité fertilisante du P de la FSLP _c aux stades boutons et floraison, étés 2007 et 2008.	39
Tableau 21	Impact de l'ajout de FSLP _c comme engrais phosphaté sur la nutrition en K, Ca et Mg des plants (4 ^e feuille, b.s.) au stade 50-75 % de floraison, étés 2007 et 2008.	40
Tableau 22	Analyses statistiques de l'impact de l'ajout de FSLP _c comme engrais phosphaté sur la nutrition en K, Ca et Mg des plants (4 ^e feuille, b.s.) au stade 50-75 % de floraison, étés 2007 et 2008	40
Tableau 23	Impact de l'ajout de FSLP _c comme engrais azoté au sol sur les rendements (b.h.) et la qualité des tubercules de pommes de terre, étés 2007 et 2008.	42
Tableau 24	Analyses statistiques de l'impact de l'ajout de FSLP _c comme engrais azoté au sol sur les rendements (b.h.) et la qualité des tubercules de pommes de terre, étés 2007 et 2008.	42
Tableau 25	Impact de l'ajout de FSLP _c comme engrais phosphaté au sol sur les rendements (b.h.) et la qualité des tubercules de pommes de terre, étés 2007 et 2008.	43
Tableau 26	Analyses statistiques de l'impact de l'ajout de FSLP _c comme engrais phosphaté au sol sur les rendements (b.h.) et la qualité des tubercules de pommes de terre, étés 2007 et 2008.	44
Tableau 27	Impact de l'ajout de FSLP _c comme engrais azoté au sol sur les concentrations en ÉTMs et nitrates (b.s.) des tubercules à la récolte.	46
Tableau 28	Analyses statistiques de l'impact de l'ajout de FSLP _c comme engrais azoté au sol sur les concentrations en ÉTMs et nitrates (b.s.) des tubercules à la récolte.	47
Tableau 29	Impact de l'ajout de FSLP _c comme engrais phosphaté au sol sur les concentrations en ÉTMs et nitrates (b.s.) des tubercules à la récolte.	47
Tableau 30	Analyses statistiques de l'impact de l'ajout de FSLP _c comme engrais phosphaté au sol sur les concentrations en ÉTMs et nitrates (b.s.) des tubercules à la récolte.	48
Tableau 31	Impact de l'ajout de FSLP _c comme engrais azoté au sol sur les contenus (b.s.) en C et N labiles du sol au stade 50-75 % de floraison, étés 2007 et 2008.	50
Tableau 32	Analyses statistiques de l'impact de l'ajout de FSLP _c comme engrais azoté au sol sur les contenus (b.s.) en C et N labiles du sol au stade 50-75 % de floraison, étés 2007 et 2008	51
Tableau 33	Impact de l'ajout de FSLP _c comme engrais phosphaté au sol sur les contenus (b.s.) en C et P labiles du sol au stade 50-75 % de floraison, étés 2007 et 2008.	53
Tableau 34	Analyses statistiques de l'impact de l'ajout de FSLP _c comme engrais phosphaté au sol sur les contenus (b.s.) en C et P labiles du sol au stade 50-75 % de floraison, étés 2007 et 2008.	54

Tableau 35	Impact de l'ajout de FSLP _c comme engrais azoté au sol sur les activités enzymatiques (b.s.) des cycles du C et du N des sols au stade 50-75 % de floraison, étés 2007 et 2008.	56
Tableau 36	Analyses statistiques de l'impact de l'ajout de FSLP _c comme engrais azoté au sol sur les activités enzymatiques (b.s.) des cycles du C et du N des sols au stade 50-75 % de floraison, étés 2007 et 2008	56
Tableau 37	Impact de l'ajout de FSLP _c comme engrais phosphaté au sol sur les activités enzymatiques (b.s.) des cycles du C et du P des sols au stade 50-75 % de floraison, étés 2007 et 2008	57
Tableau 38	Analyses statistiques de l'impact de l'ajout de FSLP _c comme engrais phosphaté au sol sur les activités enzymatiques des cycles du C et du P des sols au stade 50-75 % de floraison, étés 2007 et 2008	57
Tableau 39	Impact de l'ajout de FSLP _c comme engrais azoté au sol sur les paramètres agronomiques (b.s.) du sol à la récolte, étés 2007 et 2008.	58
Tableau 40	Analyses statistiques de l'impact de l'ajout de FSLP _c comme engrais azoté au sol sur les paramètres agronomiques (b.s.) du sol à la récolte, étés 2007 et 2008.	59
Tableau 41	Impact de l'ajout de FSLP _c comme engrais phosphaté au sol sur les paramètres agronomiques (b.s.) du sol à la récolte, étés 2007 et 2008....	60
Tableau 42	Analyses statistiques de l'impact de l'ajout de FSLP _c comme engrais phosphaté au sol sur les paramètres agronomiques (b.s.) du sol à la récolte, étés 2007 et 2008.	61
Tableau 43	Impact de l'ajout de FSLP _c comme engrais azoté au sol sur les contenus (b.s.) en ÉTMs, <i>E. coli</i> et nitrates résiduels du sol à la récolte, étés 2007 et 2008.	63
Tableau 44	Analyses statistiques de l'impact de l'ajout de FSLP _c comme engrais azoté au sol sur les contenus (b.s.) en ÉTMs, <i>E. coli</i> et nitrates résiduels du sol à la récolte, étés 2007 et 2008.	64
Tableau 45	Impact de l'ajout de FSLP _c comme engrais phosphaté au sol sur les contenus (b.s.) en ÉTMs, <i>E. coli</i> et nitrates résiduels du sol à la récolte, étés 2007 et 2008.	64
Tableau 46	Analyses statistiques de l'impact de l'ajout de FSLP _c comme engrais phosphaté au sol sur les contenus (b.s.) en ÉTMs, <i>E. coli</i> et nitrates résiduels du sol à la récolte, étés 2007 et 2008.	65
Tableau 47	Impact de l'ajout de FSLP _c comme engrais azoté au sol sur les prélèvements totaux en N (b.s.) et sur l'efficacité fertilisante du N de la FSLP _c , étés 2007 et 2008.	68
Tableau 48	Analyses statistiques de l'impact de l'ajout de FSLP _c comme engrais azoté au sol sur les prélèvements totaux en N (b.s.), étés 2007 et 2008...	68
Tableau 49	Coefficients d'utilisation et d'efficacité fertilisante de l'azote de divers produits organiques.	69

Tableau 50	Impact de l'ajout de FSLP _c comme engrais phosphaté au sol sur les prélèvements totaux en P (b.s.) et sur l'efficacité fertilisante du P de la FSLP _c , étés 2007 et 2008.	71
Tableau 51	Analyses statistiques de l'impact de l'ajout de FSLP _c comme engrais phosphaté au sol sur les prélèvements totaux en P (b.s.), étés 2007 et 2008.	71
Tableau 52	Coefficients d'utilisation et d'efficacité fertilisante du P de divers produits organiques.	72
Tableau 53	Détermination de l'ISB (b.s.) des FSLP _c utilisées à l'été 2007 et 2008...	75
Tableau 54	Analyse de 30 AEOs produits au Québec sur la base de leur ISB.	77

LISTE DES FIGURES

Figure 1	La FSLP _c (A) à la sortie du séparateur décanteur centrifuge et (B) suite à son conditionnement par aération.	22
Figure 2	Compétition entre un acide organique (l'oxalate) et un orthophosphate sur un site de fixation aluminium du P (adaptée de Fox 1995).	53
Figure 3	Engrais Kappa composé de lisier déshydraté de porcs et de fientes de volailles granulés.	73
Figure 4	Variabilité de l'ISB mesuré en laboratoire de divers AEOs (adaptée de Linères 2002). Méthode d'ISB sur base organique.	76
Figure 5	Relation entre le N minéral produit par minéralisation par kg de N _o contenu dans un produit selon son ISB pour divers AEOs (adaptée de Parent et coll. 2007). Méthode d'ISB de Gabrielle et coll. (2004) exprimés sur base organique.	78

1. DESCRIPTION DU PROJET

1.1 Introduction

Selon le dernier recensement effectué par la Fédération des producteurs de porcs du Québec (FPPQ), il existe un peu plus de 3 000 sites de production porcine au Québec. Au cours des dernières années, le volume de production s'est accru, passant de 7 399 362 têtes en 2002 à 7 768 335 en 2009 (FPPQ 2010). La production porcine québécoise occupe ainsi la 2^e place au Canada avec 24,6 % de la production totale de porcs au pays. Avec des retombées annuelles de 1,5 milliard de dollars et 23 758 emplois directs et indirects, cette production représente un atout considérable pour la vitalité des régions rurales et le développement de l'agriculture québécoise. Cependant, depuis 2002, le Règlement sur les exploitations agricoles (REA) (MDDEP 2010a) exige d'atteindre pour 2010 un équilibre de 100 % entre la capacité support des sols en P et la quantité de lisier épandue. En conséquence, les applications de lisier doivent être révisées à la baisse et plusieurs zones se retrouvent en surplus. La problématique des surplus de lisier agit ainsi comme un goulot d'étranglement au niveau du développement de la production porcine. Il est difficile de statuer sur le montant exact des pertes économiques ainsi encourues. Par contre, il est reconnu que le secteur a déjà subi une baisse importante de ses activités, passant de la première à la deuxième place au pays, accompagnée de fermetures d'usines et de la réduction des investissements. Ainsi, plusieurs efforts ont été consacrés à l'amélioration de la régie alimentaire et à l'optimisation de la régie de l'eau dans le bâtiment pour réduire les quantités de rejets. Toutefois, pour faire face aux exigences réglementaires, les technologies de traitement des lisiers offrent une voie avantageuse permettant à un certain nombre d'entreprises porcines de se consolider. Cependant, le traitement des lisiers n'est pas une fin en soi.

Dans la perspective d'en arriver à une agriculture à la fois rentable et durable, les sous-produits générés par le traitement des lisiers doivent pouvoir être adéquatement valorisés afin de ne pas passer d'un type de surplus à un autre. Pour ce faire, les propriétés fertilisantes de ces amendements et engrais organiques (AEOs) nouvellement disponibles sur le marché doivent être établies. Conséquemment, ce projet vise à fournir à l'industrie des connaissances menant à la valorisation de la fraction solide de lisier de porcs (FSLP), soit comme engrais de ferme conventionnel ou comme intrant dans l'élaboration d'engrais organo-minéraux (EOMs) granulés. Si le premier créneau relève d'un protocole plus classique avec des essais au champ pour une culture donnée, le deuxième s'inscrit dans la foulée des récents travaux de recherche effectués sur les FSLPs à l'Université Laval. Bien que la FSLP ait un grand potentiel pour la fabrication d'EOMs, son introduction dans les formulations d'engrais requiert toutefois une caractérisation plus détaillée de ses qualités fertilisantes (composition physico-chimique, coefficient d'efficacité (CE)) et une estimation précise de son comportement dans le sol. L'indice de stabilité biologique (ISB) (Linères et Djakovitch 1993), qui renseigne sur le potentiel de minéralisation des AEOs dans le sol, est une bonne mesure de ce comportement. Sa détermination est donc d'une grande utilité dans l'évaluation commerciale des FSLPs puisque la minéralisation est la force motrice de la transformation de la matière organique fraîche dans le sol, et donc de l'efficacité des AEOs.

Lors de tests récents menés au Québec, l'ISB s'est effectivement avéré être un indice fiable du potentiel de minéralisation des AEOs. De plus, il a été démontré qu'il y avait une relation étroite entre l'ISB et le potentiel de nitrification des AEOs. L'ISB semble ainsi promis à

devenir un indicateur significatif pour l'industrie des fertilisants et du compostage. L'ISB pourrait faire partie d'un système de détermination de la qualité des FSLPs en vue de leur utilisation agronomique comme compost ou granule, permettant aux industries de granulation d'ajuster leurs procédés à la qualité fertilisante demandée sur le marché. Cette intégration de la FSLP dans la fabrication des EOMs offrirait de plus une alternative à l'utilisation actuelle de la tourbe comme source de carbone (C) dans la fabrication des EOMs. Cette utilisation d'une source de C non renouvelable, qui remet en circulation du C qui était stocké sous une forme hautement stabilisée, n'est pas en accord avec le développement durable de la production porcine. Mieux vaudrait intégrer l'activité des fournisseurs d'intrants, des éleveurs porcins et des producteurs de cultures végétales, grandes consommatrices de matières fertilisantes, par l'optimisation du cycle de vie des éléments C-N-P-K, que ce soit par la valorisation directe au champ des FSLPs ou par leur intégration dans la fabrication des EOMs. Cette pratique permettrait de percer le cloisonnement qui s'est établi entre les productions animales et végétales dans la montée de la spécialisation de l'agriculture.

Il existe en ce moment des FSLPs d'origines diverses, présentant des caractéristiques très différentes, qui découlent des différents modes de traitement des lisiers utilisés. Cependant, ce projet vise à évaluer la FSLP provenant d'un séparateur décanteur centrifuge, car celle-ci se prête particulièrement bien à la valorisation en agriculture. En effet, si plusieurs FSLPs devront encore faire l'objet de travaux de recherche supplémentaires avant leur valorisation, ce n'est pas le cas de la FSLP provenant du séparateur décanteur centrifuge. Par exemple, les FSLPs obtenues par séparation sous les lattes sont beaucoup plus « pâteuses ». Composter de telles FSLPs exigera l'ajout d'agents structurants et absorbants (paille, sciures, écorces) selon des proportions qui demeurent à établir, ce qui n'est pas le cas de la FSLP provenant du séparateur décanteur centrifuge puisque à l'état brut, elle a toutes les propriétés pour composter. Martin et coll. (2006) ont en effet démontré qu'il suffit d'une légère aération pour permettre une élévation importante de sa température. Cette propriété à chauffer facilement permet à faible coût de réduire la teneur en eau, d'assainir le produit et d'atténuer les odeurs offensantes. Il existe donc une technique validée de production d'une FSLP conditionnée (FSLP_c) par aération, aisément valorisable au champ. De plus, la séparation des lisiers par centrifugation ne nécessite pas d'ajout d'agents chimiques. Les techniques de séparation faisant usage de tels additifs présentent l'inconvénient de produire des FSLPs considérées comme des matières résiduelles fertilisantes (MRFs) qui devront être gérées selon les « Critères provisoires pour la valorisation des MRFs » (MDDEP 2010b), ce qui est restrictif pour la valorisation au champ. Il faut aussi s'interroger sur le devenir des polymères organiques de types cationiques ou anioniques hydrosolubles, utilisés comme substances de coagulation dans les mélanges solide/liquide de certains procédés de traitements totaux. Les polymères cationiques à base de polyacrylamide sont les plus utilisés pour cette application et se retrouvent majoritairement, après floculation, dans la FSLP. Le sous-produit de leur dégradation est le monomère acrylamide, lequel est considéré comme une substance hautement toxique (cancérogène).

Les essais sur la FSLP_c se feront dans la culture de la pomme de terre. Au Québec, cette culture est la troisième production horticole en importance, avec 4,28 millions de tonnes métriques produites (FPPTQ 2010a). En 2010, 18 000 hectares étaient cultivés en pommes de terre, générant des recettes d'environ 150 M\$ (Institut de la statistique du Québec 2010). Cette production fait cependant face à une importante problématique de déperdition de matières organiques (MO) des sols, identifiée comme prioritaire dans le Portrait agroenvironnemental des

fermes québécoises de 1998 (BPR-GREPA 1999). En raison de la texture légère et très drainante des sols à pommes de terre et de la régie intensive en termes de travail de sol dans cette production, cette culture favorise l'oxydation rapide de la MO. Elle culture laisse aussi peu de résidus de culture à la surface des sols, ce qui provoque leur dégradation accélérée. Des déficits atteignant $\sim 1\ 800\ \text{kg C ha}^{-1}\ \text{an}^{-1}$ ont été rapportés. Ce bilan négatif doit être corrigé car l'amélioration du niveau de MO des sols ($> 3\ \%$) permet de diminuer la pression sur plusieurs indicateurs agro-environnementaux simultanément (ex. compaction, érosion). Un bon taux de MO contribue aussi à réduire les besoins en éléments fertilisants, dont le N, diminuant par conséquent les risques d'acidification des sols et de pollution diffuse. Ainsi, en 2000, la Fédération des producteurs de pommes de terre du Québec (FPPTQ) adoptait un plan d'intervention priorisant la fertilisation intégrée et considérant comme prioritaire la promotion des engrais de ferme afin de réduire de 10 % les quantités d'engrais minéraux utilisées (FPPTQ 2010b). Étant donné qu'il s'agit d'une problématique agricole, il apparaît logique d'utiliser un AEO produit par l'agriculture afin de maximiser le cycle de vie des intrants qui y sont utilisés. Parmi l'éventail de choix possibles, il est important de cibler un AEO qui apporte non seulement du carbone, mais qui présente également de bonnes caractéristiques de fertilisation susceptibles de contribuer directement à la nutrition des plantes.

Dans cet ordre d'idées, la valorisation de la FSLP_c s'avère intéressante puisqu'en étant à la fois bien pourvue en NPK et riche en MO, elle contribue à solutionner en partie deux problématiques majeures de la production agricole québécoise. Par exemple, contrairement à l'application de lisier qui pose un risque de diffusion des éléments fertilisants solubles et accélère la détérioration de la MO des sols, l'épandage de 10 t b.h. ha⁻¹ de FSLP_c ajouterait environ 2 000 kg de C (Martin et coll. 2006). De plus, étant donné la synergie qui existe entre l'apport de MO facilement minéralisable et la croissance et l'activité des microorganismes bénéfiques du sol, il devient très à propos de tenter de maximiser les processus naturels de fertilité des sols dans un contexte de plus en plus réglementé. L'application de FSLP_c pourrait en effet avoir une action bénéfique indirecte sur les rendements par son impact positif sur les propriétés physiques et biologiques du sol, puisque l'ajout de MO nouvelle en voie de décomposition sert aussi de liant et permet d'améliorer l'agrégation et la structure des sols, favorisant ainsi la circulation de l'air et de l'eau. La FSLP_c semble donc présenter une valeur ajoutée très intéressante d'un point de vue écologique puisque les gens sont de plus en plus sensibilisés à l'importance de tirer parti des processus naturels de fertilité des sols. Cette qualité intrinsèque permettrait de la distinguer favorablement des engrais minéraux dans un contexte commercial. Elle pourrait aussi remplacer avantageusement certains AEOs d'origine municipale ou industrielle, sans les contraintes réglementaires imposées à ces MRFs. Ces considérations renforcent la pertinence de conduire un essai en conditions réelles de production pour connaître la véritable valeur fertilisante de la FSLP_c et pour détailler convenablement son impact bénéfique sur la qualité des sols. Des connaissances permettant la mise sur pied de filières de traitement des lisiers viables et potentiellement rentables seront ainsi acquises. Cette visée concorde avec les orientations de recherche priorisées par la Table filière porcine du Québec (REF 2006). En effet, celle-ci a inclus parmi les enjeux « Environnement et conditions d'élevage » déterminants pour le maintien de la compétitivité de la filière porcine, le développement d'une filière viable de traitement des lisiers.

1.2 Objectif général

Développer les outils et les connaissances qui permettront de positionner avantageusement la FSLP_c sur le marché des engrais organiques et organo-minéraux granulés; un incontournable pour favoriser l'adoption de toutes technologies de traitement.

1.3 Objectifs spécifiques

- Effectuer la caractérisation biochimique de la FSLP_c sur la base de ses contenus en nutriments majeurs et mineurs, en carbone et en éléments traces métalliques (ÉTMs).
- Évaluer l'impact de l'ajout de FSLP_c au sol en relation avec la nutrition et le développement des parties aériennes des plants en cours de saison et le rendement en tubercules à la récolte.
- Évaluer l'impact de l'ajout de FSLP_c au sol sur la base de leur richesse en nutriments, principalement au niveau des pools labiles de C, N et P, de même que sur leurs contenus en éléments traces métalliques et *E. coli*.
- Évaluer l'impact de l'ajout de FSLP_c aux sols en relation avec leur potentiel métabolique, incluant les enzymes liées aux cycles du C, N et P.
- Évaluer les coefficients d'efficacité fertilisante (CE) de N et P de la FSLP_c afin de permettre le calcul des doses à épandre en fonction des besoins des plantes dans le but de réduire l'emploi des engrais de synthèse et de proposer une voie économiquement rentable et durable de valorisation des surplus de lisier.
- Effectuer le transfert de connaissances entre le laboratoire de SGA (Sols et génie agroalimentaire) l'Université Laval et le laboratoire de l'IRDA afin de rendre accessible à l'industrie et aux producteurs la méthodologie permettant de calculer l'indice de stabilité biologique (ISB).
- Caractériser la FSLP_c sur la base de l'ISB afin de pouvoir ultérieurement la comparer aux divers amendements organiques utilisés en agriculture.

1.4 Atteinte des objectifs

Dans le cadre de cette étude, aucune difficulté particulière n'a été rencontrée. L'ensemble des objectifs a été atteint. Tous les prélèvements de sol et de matériel végétal, ainsi que toutes les analyses qui devaient être effectués ont été réalisés sans modification au protocole. Notons, en premier lieu, le succès du transfert de connaissances entre le laboratoire du Dr Léon-Étienne Parent du Département des sols et de génie agroalimentaire (SGA) de l'Université Laval et le laboratoire de l'Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA) inc. sur la méthode de détermination de l'indice de stabilité biologique (ISB). Des discussions avec les membres actifs du SGA ont permis d'amorcer la procédure d'implantation de la méthode de l'ISB. Le personnel de laboratoire de l'IRDA a été invité à examiner les appareils et à obtenir les

renseignements sur leur fonctionnement. Il a ensuite reçu une formation sur l'analyse de l'ISB. Ces démarches ont permis d'implanter au laboratoire de l'IRDA, une méthodologie novatrice qui sera désormais accessible à l'industrie et aux producteurs. Les clientèles cibles pourront ainsi sur demande comparer entre eux des produits organiques d'origines et de maturités diverses. Le premier produit caractérisé au niveau de l'ISB a d'ailleurs été la FSLP_c utilisée dans ce projet.

Au cours des 2 années d'étude, la FSLP_c a pu être obtenue dans les temps, du même producteur agricole, ayant conservé une production similaire les deux années. La FSLP_c était ensuite conditionnée dans les installations prévues à cet effet à la Station de recherche de Saint-Lambert appartenant à l'IRDA. La FSLP_c était ensuite transportée à la Station de recherche de Deschambault de l'IRDA, où les cultures de pommes de terre étaient produites. À chacune des années, les délais entre la production de la FSLP_c et son conditionnement d'une part, et entre sa maturation et son utilisation au champ d'autre part, ont été du même ordre de grandeur. Cependant, le dosage de l'ISB de la FSLP_c de 2007 n'a pas pu être effectué dans le même délai que celui pour la FSLP_c de 2008 puisque la méthode de dosage de l'ISB se déroulait en parallèle au projet. Ainsi, le dosage de l'ISB des deux FSLP_c s'est fait au même moment, au printemps de 2008. La valeur d'ISB pour la FSLP_c de 2007 est donc différente de celle de la FSLP_c de 2008 puisque celle-ci a poursuivi sa maturation une année de plus. Les résultats sont toutefois concordants avec cette réalité puisque la FSLP_c de 2007 présente un ISB plus haut, indiquant un matériel organique plus stable, que l'ISB de la FSLP_c de 2008.

Les saisons 2007 et 2008 ont présenté des conditions climatiques permettant une bonne croissance et l'atteinte de bons rendements. Les courbes de réponse à l'azote et au phosphore nécessaires à la bonne conduite du projet ont donc été obtenues les deux années. Le site expérimental, bien qu'étant de qualité (bonne structure de sol et taux de MO) et de texture adéquate pour la culture de la pomme de terre, avait été choisi afin de s'assurer que la fertilité naturelle des sols ne présente pas une richesse qui viendrait masquer l'efficacité des engrais en réduisant les besoins d'apports externes en nutriments. De plus, les traitements fongicides préventifs, effectués à différentes reprises durant la saison, ont été efficaces. Ainsi, aucune présence de mildiou n'a été observée au champ pour les deux années de l'étude. Le suivi hebdomadaire de la culture a aussi permis un contrôle très efficace des doryphores qui n'ont causé que des dommages mineurs à la culture. L'impact de la FSLP_c sur la nutrition et le développement des plants représente, selon nous, adéquatement le potentiel fertilisant en N et P de ce produit organique. Dans un même ordre d'idée, nous croyons que les CE obtenus permettront un calcul juste de la valeur en engrais minéraux de la FSLP_c testée.

En ce qui a trait à l'impact des apports de FSLP_c sur les sols, considérant d'une part que le site choisi est représentatif des champs en production de pommes de terre et, d'autre part, qu'un large éventail de doses a été testé au cours des 2 années, nous croyons qu'une évaluation adéquate a été réalisée et que celle-ci permet de bien cerner l'impact, du moins à court terme, de l'ajout de FSLP_c sur la composition en nutriments majeurs et mineurs, le contenu en carbone, en ÉTMs et en *E. coli* des sols. De même, cette étude a permis de faire ressortir l'effet bénéfique de l'apport de FSLP_c sur l'activité biologique des sols. En fait, la grande diversité des analyses, couvrant à la fois le côté chimique et biologique, a fait en sorte que l'influence de la FSLP_c sur la nutrition N et P des plants a pu être expliquée. La considération d'un seul type d'analyse (chimique ou biologique) aurait fortement limité notre compréhension du potentiel fertilisant de

la FSLP_c puisque la composante biologique semble fortement impliquée dans l'efficacité azotée du produit, tandis que la composante chimique semble prévaloir dans sa fertilité phosphatée.

La synthèse des résultats de cette étude permet donc d'atteindre le but principal recherché par ce travail, soit d'octroyer une valeur économique et agronomique intéressante à la FSLP_c, ouvrant ainsi des débouchés prometteurs à la valorisation des surplus de lisier.

2. MATÉRIEL ET MÉTHODE

2.1 Mise en place de l'expérience

Le projet, d'une durée de 2 ans, s'est déroulé à la Station de recherche de Deschambault. Le sol en culture était un loam sableux. Selon l'analyse de sol (b.s.) de la strate 0-20 cm faite au printemps de 2007 pour caractériser le site, le sol contenait 3,9 % de matière organique (MO) et avait un pH_{eau} de 6,1. Son contenu en azote total (N_{tot}) était de 0,17 %. Les contenus en éléments Mehlich-3 (M3) étaient de 195 kg P ha⁻¹, 229 kg K ha⁻¹, 3 590 kg Al ha⁻¹, 816 mg Ca kg⁻¹, 35 mg Mg kg⁻¹, 1,1 mg Cu kg⁻¹ et 1,9 mg Zn kg⁻¹. Le sol avait ainsi une saturation en P_{M3}/Al_{M3} de 5,4 %.

Des tubercules entiers (cv *Goldrush*) ont été plantés à 33 cm d'espacement sur le rang (densité de 32 584 plants ha⁻¹) le 7 juin 2007 et le 28 mai 2008. Les pommes de terre ont été récoltées le 16 octobre 2007 et le 30 septembre 2008. En 2008, bien que le dispositif ait été établi au même site qu'en 2007, un soin particulier a été apporté afin de s'assurer de ne pas établir de parcelles sur des sols utilisés en 2007; ceci afin de s'assurer de toujours mesurer l'effet de première année d'application de la FSLP_c, évitant tout arrière effet fertilisant possible de la FSLP_c.

2.2 Dispositif expérimental et traitements

Afin de pouvoir évaluer la réponse de la culture aux engrais et de mesurer les coefficients d'efficacité (CE) N et P de la FSLP_c, ce projet comportait des témoins permettant de connaître la fertilité naturelle en N et P du site. De plus, pour fins de comparaison avec les engrais minéraux, un témoin recevant les doses recommandées en NPK selon la grille de référence en fertilisation pour la pomme de terre (CRAAQ 2003) a été inclus. Enfin, pour s'assurer de bien évaluer les CE du N et P de la FSLP_c, trois doses de FSLP_c ont été testées pour le N et pour le P. La comparaison de plusieurs doses est nécessaire pour déterminer adéquatement les CE puisque l'emploi d'une dose trop forte sous-estimera les CE, tandis qu'une dose trop faible surestimera les CE. Étant donné que les CE du N et P de la FSLP_c ne sont pas connus, des CE estimés *a priori* sur la base de la caractérisation physico-chimique de la FSLP_c ont du être utilisés afin de combler le plus justement possible 70, 100 et 130 % de la quantité de N recommandée. Pour le N, les critères retenus ont été principalement les contenus en N_{tot}, en N organique (N_o), en N-NO₃ et N-NH₄, ainsi que le rapport C/N. Pour le P, les contenus en P soluble à l'eau (P_{eau}), en P total (P_{tot}), en P minéral (P_{HCl}) et le C/N ont été retenus. Ces critères ont servi à adapter les CE recommandés pour les fumiers et lisiers du Guide de référence en fertilisation du Québec (CRAAQ 2003).

Les 10 traitements comparés étaient donc :

- Un témoin sans engrais N complémenté en engrais minéral PK (OPK);
- Un témoin sans engrais P complémenté en engrais minéral NK (NOK);
- Un témoin NPK.

- Trois traitements sans engrais N minéral recevant leur N uniquement sous forme de FSLP_c, incluant une dose intermédiaire correspondant à 100 % de la quantité de N recommandée, le P et le K étant complémentés par des engrais minéraux.
 - 2007 : 6, 9 et 12 t b.h. FSLP_c ha⁻¹
 - 2008 : 5, 7,5 et 10 t b.h. FSLP_c ha⁻¹

- Trois traitements sans engrais P minéral recevant leur P uniquement sous forme de FSLP_c, incluant une dose intermédiaire correspondant à 100 % de la quantité de P₂O₅ recommandée, le N et le K étant complémentés par des engrais minéraux.
 - 2007 : 1,5, 2,5 et 3,5 t b.h. FSLP_c ha⁻¹
 - 2008 : 1,25, 1,75 et 2,5 t b.h. FSLP_c ha⁻¹

- Un traitement mixte FSLP_c + engrais minéraux afin de représenter la réalité des producteurs devant se conformer aux quantités réglementaires d'apports de P (REA; MDDEP 2010a). L'apport de FSLP_c correspondait donc à la quantité recommandée et réglementaire de P pour la pomme de terre selon les CE estimés *a priori* à chacune des années (2007 : 2,75 t b.h. ha⁻¹; 2008 : 2,0 t b.h. ha⁻¹). Cet apport comblait du même coup une partie du N recommandé, le complément étant fourni sous forme d'engrais minéral, comme 100 % du K recommandé.

Les engrais minéraux utilisés étaient le 27-0-0, le 0-46-0 et le 0-0-60. La FSLP_c provenait de la même entreprise d'engraissement des porcs, située en Chaudière-Appalaches, les deux années. La FSLP_c a été obtenue par centrifugation avec un séparateur décanteur centrifuge ASSERVA 300. Par la suite, elle a été conditionnée en entrepôt par aération selon la méthode développée par Martin et coll. (2006). Chacune des parcelles comprenait quatre rangs de 8 m de long, espacés de 0,93 m. La FSLP_c et les engrais minéraux ont été appliqués à la main. Toutes les matières fertilisantes ont été appliquées au printemps, à la plantation, à l'exception du Combo, où, dans un souci de représentation de la réalité du producteur, 54 % du N fut appliqué au printemps et le reste au fractionnement. Ce dernier a été effectué en bande, à la main, le 25 juin 2007 et le 4 juillet 2008. Dans tous les cas, les engrais minéraux complémentés ont été apportés aux doses recommandées selon la grille de référence en fertilisation pour la pomme de terre (CRAAQ 2003). Outre la fertilisation, la régie de production a été similaire à celle employée par les producteurs de pommes de terre du Québec et la régie de protection a été faite selon les recommandations du CRAAQ et du Réseau d'avertissements phytosanitaires (RAP).

2.3 Caractérisation de la fraction solide de lisier de porcs

La FSLP_c a été caractérisée au niveau physico-chimique. Chaque année, la FSLP_c était homogénéisée dans un « mélangeur/broyeur » à sol. Huit échantillons étaient ensuite prélevés pour analyse. Les échantillons ont été placés dans une glacière et conservés à 4 °C. Ils ont ensuite été tamisés à 2 mm. Les paramètres mesurés englobaient le pH à l'eau (pH_{eau}), le taux de matières

sèches à 105 °C (MS) et de matières organiques (MO) (Recommended Methods of Manure Analysis, Peters 2003). Le carbone labile a été mesuré par la méthode du carbone soluble à l'eau (C_{eau}) de Garcia et coll. (1990). Le carbone total (C_{tot}) a été calculé avec la méthode des cendres selon la formule '100-cendres' pour obtenir la quantité de MO, elle-même ensuite divisée par le facteur 2,0 qui est plus juste dans le cas des AEOs que le facteur 1,724, utilisé pour les sols (Giroux et Audesse 2004). Les formes disponibles d'azote inorganique ont été déterminées par le dosage des nitrates ($N\text{-NO}_3$) et de l'ammonium ($N\text{-NH}_4$) au KCl 2M (Isaac et Johnson 1976), puis déterminées par colorimétrie automatisée. Le N_{tot} a été extrait par digestion Kjeldahl et dosé par colorimétrie sur autoanalyseur Technicon. Le N organique (N_o) a été estimé par différence entre le N_{tot} et la somme des $N\text{-NO}_3$ et des $N\text{-NH}_4$. Le C/N a donc été calculé en divisant le C obtenu par la méthode des cendres par le N_{tot} Kjeldahl. Le phosphore (P) labile a été évalué par le P soluble à l'eau (P_{eau}) (Sissingh 1971) et le P_{tot} par digestion à l'acide sulfurique (voie humide) (Isaac et Johnson 1976), suivie d'une détermination par spectrométrie d'émission au plasma. Le P minéral a été extrait au HCl 2,5N (P_{HCl}) (Salomons et Gerriste 1981), puis déterminé par colorimétrie automatisée. Les contenus en potassium (K), calcium (Ca) et magnésium (Mg), de même qu'en ÉTMs (Al, Fe, Mn, Zn, Cu) ont été mesurés par digestion à l'acide sulfurique. Enfin, les concentrations en *E. coli* et coliformes totaux au moment de l'épandage ont été déterminées selon la méthode des tubes multiples (MA. 700-Ec-tm 1.0) (CEAEQ 2009). La médiane a été retenue au lieu de la moyenne arithmétique qui est trop fortement influencée par les hautes valeurs.

Par ailleurs, la FSLP_c a été caractérisée au niveau de son indice de stabilité biologique (ISB), qui est un indicateur de l'état de décomposition de la MO contenue dans les amendements et fertilisants organiques. La méthode employée pour réaliser les essais est similaire à celle développée en 2007 au laboratoire du Dr Léon Etienne Parent de l'Université Laval, et consiste en une adaptation de la méthode originale AFNOR (XP U44-162) (2005) utilisant un digesteur de fibre (ANKOM 200) de la compagnie ANKOM Technology. Cette procédure est plus avantageuse par rapport à la méthode traditionnelle AFNOR puisqu'elle nécessite moins de temps technicien. Globalement, elle consiste en une dissolution chimique séquentielle des divers constituants fibreux contenus dans la paroi cellulaire des plantes, soit une grande variété de polysaccharides structuraux souvent liés à des protéines, à des phénols et plus particulièrement à la lignine. La dissolution des fibres se fait en trois étapes successives, soit au détergent neutre, puis à l'acide faible, suivi d'une dissolution à l'acide concentré, le tout à chaud. Une autre fraction de la MO est dissoute en milieu acide puis alcalin pour les fibres brutes (crude fibers) (tableau 1).

Tableau 1. Étapes constituant la méthode de dosage de l'ISB.

Type de fibres	Composés dissous	Composés résiduels	Réactifs
NDF (Neutral Detergent Fiber)	Pectines	Hémicellulose	Détergent neutre Eau bouillante
	Protéines	Cellulose	
	Sucres	Lignine	
	Lipides	Une partie des pectines	
ADF (Acid Detergent Fiber)	Hémicellulose	Cellulose	H ₂ SO ₄ 1,00 N Acétone
	Minéraux solubles	Lignine	
ADL (Acid Detergent Lignin)	Cellulose	Une partie des hémicellulose et/ou composés azotés	H ₂ SO ₄ 72 %
	Hémicellulose	Lignine	
CF (Crude Fiber)	Hémicellulose	Cutines	H ₂ SO ₄ 0,13 mol/L NaOH 0,23 mol/L
	Composés azotés	Cellulose brute	
		Une partie de hémicellulose et lignine	

Pour débiter, l'échantillon est séché à 38 °C pendant 72 heures, puis passé dans un tamis de 4 mm. Ensuite, à partir de l'échantillon séché, trois prélèvements de 0,5 g sont faits pour la détermination du NDF, ADF et ADL, ainsi qu'un prélèvement de 1,0 g, pour celui des fibres brutes. Ces sous-échantillons sont transférés dans les sachets ANKOM. La MO de chaque échantillon est aussi déterminée. Les trois premiers sachets sont réunis dans l'appareil ANKOM et lavés à l'eau bouillante. Les échantillons sont lessivés avec la solution de NDF à ébullition pour 75 minutes, puis lavés à l'eau bouillante. Le premier sachet est mis de côté pour séchage. Les deux sachets restants sont lessivés avec la solution de ADF à ébullition pour 60 minutes puis lavés à l'eau bouillante. Le second sachet est mis de côté pour séchage. Le troisième sachet est lessivé à l'acide sulfurique à froid pour trois heures, puis lavé à l'eau bouillante et mis de côté pour séchage. Le quatrième prélèvement est lessivé avec une solution d'acide sulfurique diluée à ébullition pour 40 minutes, lavé à l'eau, puis lessivé avec la solution d'hydroxyde de sodium et diluée à ébullition pour un autre 40 minutes. Les échantillons sont lavés à l'eau chaude et mis de côté pour séchage. Les quatre échantillons sont finalement séchés à 102 °C pendant quatre heures, refroidis au dessiccateur, puis pesés. Les sachets sont ensuite placés dans une fournaise à 600 °C pour six heures, refroidis et pesés pour déterminer la matière minérale.

Chaque fraction résistante (ADF, NDF, ADL et CF) est calculée comme suit :

$$\% \text{Fraction organique résistante} = 100 \times \frac{(\text{poids échantillon après lessivage} - \text{poids cendre})}{\text{poids échantillon}}$$

Les résultats de chaque fraction peuvent aussi être rapportés par rapport à la quantité de MO présente dans chaque échantillon en divisant le résultat précédent par la teneur en MO. Suite à la détermination de chacun des paramètres expérimentaux précédents, les quantités relatives de fractions solubilisées pendant l'extraction sont déduites.

$$\begin{aligned} \text{SOL}^1 &= 100 - \text{NDF} \\ \text{HEM}^2 &= \text{NDF} - \text{ADF} \\ \text{CEL}^3 &= \text{ADF} - \text{ADL} \\ \text{LIC}^4 &= \text{ADL} \\ \text{CEW}^5 &= \text{CF} \end{aligned}$$

À partir de chacun des composés nommés précédemment, qu'il soit calculé sur une base échantillon ou MO totale, il est possible d'estimer la stabilité biologique du produit à l'aide de l'équation de l'ISB de Gabrielle et coll. (2004).

$$\text{ISB} = 211,2 - (2,009 \times \% \text{ SOL}) - (2,378 \times \% \text{ HEM}) + (0,840 \times \% \text{ LIC}) - (2,216 \times \% \text{ CEW})$$

La valeur de l'ISB obtenue par cette méthode est généralement située entre 0 et 100 %. Par contre, Tremblay (2008) a démontré que pour certaines matières fertilisantes analysées au Québec, l'ISB variait entre -0,9 à 120 %. Une modification des constantes de l'équation de l'ISB a alors été proposée pour normaliser les résultats entre 0 et 100.

¹ SOL = Composés organiques solubles à l'eau (protéines, sucres et lipides).

² HEM = Approximation des hémicelluloses.

³ CEL = Approximation de la cellulose.

⁴ LIC = Somme des lignines et cutines. Cette fraction peut contenir des composés azotés.

⁵ CEW = Cellulose brute.

$$\text{ISB} = 137,2 - (1,218 \times \% \text{ SOL}) - (1,442 \times \% \text{ HEM}) + (0,509 \times \% \text{ LIC}) - (1,344 \times \% \text{ CEW})$$

L'analyse d'un échantillon témoin très homogène a démontré que la méthode est très reproductible, avec des écarts-types relatifs < 5 % pour chacune des familles d'AEOs. De plus, l'analyse d'un échantillon en duplicata a montré que la variabilité la plus grande se retrouve au niveau du calcul de HEM, qui découle de la soustraction de deux paramètres. Pour les autres familles de composés, dont le calcul est direct, la variabilité est très faible avec des écarts-types relatifs < 3 %. Dans le cas d'échantillons prélevés aléatoirement dans un tas de fumier composté, la variabilité est plus grande pour l'ensemble des classes de composés dû principalement à l'hétérogénéité des échantillons et au calcul pour la détermination de HEM. Dans le cas de la CF, la masse finale pesée est généralement très faible (mg), ce qui augmente la variabilité des mesures. Pour un échantillon bien homogénéisé, la variabilité générale est d'environ 4 %, ce qui se rapproche de la variabilité expérimentale. Par contre, on retrouve encore une fois une plus grande variabilité dans la mesure de HEM et de CF. Pour le CF, la faiblesse de la masse récupérée expliquerait cette variabilité.

2.4 Nutrition, développement et rendement des plants

À trois reprises pendant la saison, soit aux stades boutons floraux, 50-75 % de floraison et défanage, la biomasse aérienne entière des plants a été déterminée pour calculer leur production en matière sèche et leur composition en éléments majeurs et mineurs. Dans chacune des parcelles, quatre plants ont été prélevés. Ceux-ci étaient ensuite séchés à 65 °C et broyés ensemble à 100 mesh pour former un échantillon composite sur lequel les analyses de laboratoire ont été exécutées. Le N_{tot} , P_{tot} , K, Ca, Mg et les ÉTMs ont été extraits par digestion Kjeldahl (Isaac et Johnson 1976). Le N_{tot} a été dosé par colorimétrie sur autoanalyseur Technicon. Le P_{tot} , K, Ca, Mg et les ÉTMs ont été déterminés par spectrométrie d'émission au plasma. L'analyse du N_{tot} , P_{tot} , K, Ca et Mg de la 4^e feuille mature des plants, reconnue comme l'indicateur nutritionnel le plus fiable dans la culture de la pomme de terre, a aussi été réalisée au stade floraison. Dans chacune des parcelles, 10 feuilles ont été prélevées, séchées à 65 °C et broyées ensemble à 100 mesh pour former un échantillon composite sur lequel les analyses de laboratoire ont été exécutées. Nous avons pris le soin de conserver les échantillons frais dans une glacière entre leur prélèvement au champ et leur réception au laboratoire. Lors de la récolte, un échantillon composite de cinq tubercules sains, non-pelés et nettoyés, a été prélevé dans chaque parcelle. Les tubercules ont été découpés puis séchés à 65 °C et broyés. Les nitrates ont été obtenus par extraction à l'eau (Maynard et Kalra 1993). Le N_{tot} , le P_{tot} , les éléments majeurs et les ÉTMs ont été extraits selon la méthode Kjeldahl (Isaac et Johnson 1976). Les formes de N ont été dosées par colorimétrie automatisée sur autoanalyseur Technicon. Le contenu des autres éléments a été déterminé par spectrométrie d'émission au plasma. Les exportations et les prélèvements totaux (PVL_{tot}) en éléments ont été calculés comme suit :

Exportations de X = MS du rendement total en tubercules * Concentration en X des tubercules

$PVL_{\text{tot}} \text{ X} = (\text{MS} * \text{Concentration en X}) \text{ des plants défanage} + \text{Exportations en X}$

Une fois les PVL_{tot} connus pour chacun des traitements, le coefficient d'utilisation apparente (CUA) du N ou du P peut être calculé. Le CUA s'établit en comparant la quantité de N ou P fournie par les produits fertilisants testés (minéral ou FSLP_c) en comparaison de ce que le sol seul fournit. Pour obtenir le coefficient d'efficacité (CE), les CUA du N ou P obtenus pour la FSLP_c à l'essai sont ensuite comparés à ceux obtenus pour les engrais minéraux usuels, testés en même temps, dont l'efficacité est la mesure étalon. En effet, bien que le CUA du N ou P des engrais minéraux ne soit jamais de 100 %, le taux d'utilisation qu'ils atteignent est considéré comme étant le plus haut taux possible. Leur efficacité fertilisante est donc considérée par défaut égale à 100 %. Le CUA et le CE sont donc calculés selon l'équation suivante (exemple pour le N) (Giroux et coll. 2007) :

$$(1) \text{ CUA engrais minéral (\%)} = \frac{\text{PVL}_{\text{tot N traitement N engrais minéraux}} - \text{PVL}_{\text{tot N témoin non fertilisé en N}}}{\text{Dose totale en N apportée par l'engrais minéral}}$$

$$(2) \text{ CUA FSLP}_c (\%) = \frac{\text{PVL}_{\text{tot N traitement N FSLP}_c} - \text{PVL}_{\text{tot N témoin non fertilisé en N}}}{\text{Dose totale en N apportée par la FSLP}_c}$$

$$(3) \text{ CE (\%)} = \frac{\text{CUA FSLP}_c}{\text{CUA engrais minéral}}$$

Ce coefficient permet de comparer des produits fertilisants d'origines très diverses et d'établir l'un par rapport à l'autre, leur potentiel comme fertilisant N ou P.

Lors de la récolte, les rendements ont été mesurés à partir des tubercules récoltés sur 6 mètres dans les deux rangs centraux de chaque parcelle. Les tubercules ont été classés par calibre. Les rendements totaux et vendables (Canada N° 1; excluant le Canada N° 1 - 3/4 à 1 5/8 po grenaille) ont été déterminés. La qualité des tubercules a aussi été établie. D'une part, la présence de gale commune (*Streptomyces scabies*) a été évaluée. L'évaluation du niveau d'infestation des tubercules par la gale commune a été réalisée à partir d'une méthode développée par Otrysko et Banville de la Station de recherches Les Buissons du MAPAQ. L'indice de gale calculé par cette méthode utilise un facteur de pondération variant de 1 à 5, qui tient compte à la fois de l'étendue et du type de symptôme observé sur les tubercules. Par exemple, on attribue un facteur de pondération plus élevé aux tubercules dont les tissus sont altérés en profondeur ou présentant des symptômes regroupés ou confluent, que dans le cas où la pelure est affectée sur une plus grande étendue mais de façon superficielle. Vingt-cinq tubercules (calibre Canada N°1) ont été prélevés de façon aléatoire dans chacun des lots récoltés. Chaque tubercule a été classé selon une sévérité croissante des dégâts (superficiel, pustule, confluent ou creux profonds) et selon la superficie couverte par les dommages sur le tubercule (0 % à trace, trace à 5 %, 5-20 %, 20-40 %, 40 % et +). Le nombre total de tubercules par catégorie a ensuite été calculé. Le facteur de pondération approprié a été attribué à chacune des catégories en fonction de l'intensité de la combinaison sévérité et étendue des dommages. L'indice de gale a ensuite été calculé en additionnant les résultats issus de la multiplication du nombre de tubercules d'une catégorie par son facteur de pondération, puis en divisant cette somme par le nombre total de tubercules évalués. Le poids spécifique a été mesuré à partir d'un sous-échantillon de 3 kg de tubercules par parcelle. Le sous-échantillon a d'abord été pesé (poids dans l'air). Les tubercules ont été plongés dans l'eau et le poids noté à nouveau (poids dans l'eau). Le poids spécifique est issu de la division du poids dans l'air par la différence entre le poids dans l'air et celui dans l'eau.

2.5 Analyses chimiques et biologiques des sols

Les sols ont été analysés aux niveaux chimique et biologique. Pour toutes les analyses, les échantillons étaient prélevés dans la strate 0-20 cm. Les échantillons étaient toujours constitués d'un mélange composite de 12 prélèvements de sol par parcelle, excepté pour l'échantillonnage de printemps. En effet, pour caractériser le site, 2 échantillons composites constitués chacun de 12 prélèvements de sol ont été analysés pour chacun des 4 blocs du dispositif. Lors de l'échantillonnage, les sols ont été placés dans une glacière et conservés à 4 °C jusqu'à leur analyse.

Lors de chaque échantillonnage, les sols frais étaient tamisés à 2 mm puis séchés à l'air à 21 °C, excepté ceux servant aux dosages des N-NO₃ et N-NH₄, des activités enzymatiques et des tests d'incubation, tous effectués sur des sols tamisés frais. Seuls les sols servant à l'analyse du C organique ont été broyés à 100 mesh. Des échantillons de sol ont été prélevés au printemps pour mesurer le pH_{eau} dans un rapport sol/eau 1:1. Le contenu en MO totale a été mesuré selon la méthode d'oxydation par voie humide de Walkley Black, et la MO labile a été obtenue par suspension de la fraction légère de la MO dans une solution d'iodure de sodium (densité ≈ 1,65 g/ml) (Nelson et Sommers 1982). Le N minéral a été extrait au KCl 2M (Isaac et Johnson 1976) sur sol humide. Les contenus en nitrates (N-NO₃) et en N ammoniacal (N-NH₄) ont ensuite été déterminés par colorimétrie automatisée. Le N facilement minéralisable (hydrolysable) a été déterminé par extraction au bicarbonate 0,01M (Fox et Piekielek 1978) suivie d'une lecture de l'absorption à 260 nm (Giroux et Tran 1987). Le N_{tot}, préalablement extrait par digestion Kjeldahl, a été déterminé par colorimétrie sur autoanalyseur Technicon. Les formes extractibles du P, des éléments mineurs et des métaux ont été extraites dans une solution Mehlich-3 (Tran et Simard 1993). L'extraction au Mehlich-3 des métaux a été choisie car plusieurs travaux de longue durée ont mis en évidence que les apports répétés d'engrais de ferme sur 10 ans pouvaient amener une augmentation très importante de la fraction labile (Mehlich 3) des métaux, même si leur teneur totale dans le sol n'augmentait pas (Giroux et coll. 2004). Le P_{tot} a aussi été extrait selon la méthode EPA 3050 (US Environmental Protection Agency 1996). Les contenus ont été dosés au moyen de la spectrométrie d'émission au plasma. Le P_{eau} a été déterminé conformément à la méthode Sissingh (1971) et le C_{eau} selon celle proposée par Garcia et coll. (1990). Ces paramètres ont également été analysés lors d'un échantillonnage au moment de la récolte, en plus des contenus en *E.coli* et coliformes totaux résiduels dans le sol, déterminés selon la méthode de dénombrement par tubes multiples (MA. 700-Ec-tm 1.0).

Un 3^e échantillonnage avait lieu au stade 50-75 % de floraison de la pomme de terre pour doser le N hydrolysable (N_{Hydro}), les éléments majeurs et mineurs Mehlich-3, le C_{eau}, les phosphatases acide et alcaline, l'uréase et la déshydrogénase. L'activité des phosphatases a été évaluée par l'hydrolyse d'une solution de para-nitrophénylphosphate de pH 6,5 et 11, respectivement, après une incubation de 1 heure à 37 °C (Tabatabai et Bremner 1969). La production de *p*-nitrophénol a ensuite été mesurée par spectrophotométrie à 410 nm. L'activité de l'uréase a été mesurée par dégagement de N-NH₄ suite à l'incubation des sols en présence d'une solution d'urée pendant 2 heures à 37 °C (Kandeler et Gerber 1988). Le N-NH₄ a ensuite été dosé par colorimétrie sur autoanalyseur Technicon. Le pouvoir de minéralisation du N_o a été déterminé par incubation des sols à 25 °C pendant 20 jours (Fox et Piekielek 1978). Les contenus en NH₄ et NO₃ ont été déterminés au temps zéro et après 20 jours. Au cours du processus de minéralisation, le dégagement de CO₂ a été capté par l'introduction, dès le départ, d'une fiole contenant du

NaOH 1N, renouvelée aux dix jours. Les quantités de CO₂ ont ensuite été déterminées par titration acidimétrique au HCl 1N. Le pouvoir de minéralisation du P a également été mesuré par incubation via la mesure du P_{eau} (Sissingh 1971) au temps zéro et temps 20 jours. La mesure de la déshydrogénase a été effectuée sur les sols séchés à l'air et tamisés à 2 mm. Elle est basée sur le dosage colorimétrique du TPF (2,3,5-triphénylformazan) (Kandeler et Gerber 1988). Les éléments majeurs disponibles ont été extraits selon la méthode Mehlich-3 (Tran et Simard 1993) et dosés par spectrométrie d'émission au plasma. Finalement, le C_{eau} a été dosé au SHIMADZU TOC-5000 (Garcia et coll. 1990). L'indice du métabolisme potentiel (IMP) a été déterminé par le ratio C_{eau}/ déshydrogénase (Masciandaro et coll. 2004).

2.6 Analyses statistiques

L'expérience a été réalisée selon un plan à blocs aléatoires complets comprenant quatre blocs et dix traitements. L'analyse de variance des paramètres mesurés a été effectuée avec la procédure PROC MIXED de SAS. Un modèle mixte comprenant l'effet fixe du traitement et l'effet aléatoire des blocs a été utilisé. Les moyennes ajustées au modèle ont été calculées pour chaque traitement. Lorsque l'effet du traitement était significatif, des tests de comparaisons multiples étaient effectués. Des contrastes ont été exécutés pour tester les effets linéaire et quadratique de la dose de FSLP_c sur les paramètres mesurés. Dans les cas où au moins un contraste linéaire ou quadratique était significatif, une analyse de régression de la variable dépendante sur la dose de FSLP_c a été menée à l'aide de la procédure PROC REG de SAS. Pour les modèles d'analyse de variance et de régression, on suppose que les erreurs du modèle sont indépendantes et obéissent à une loi normale de moyenne 0 et de variance uniforme. Ces postulats ont été validés à l'aide de graphiques des résidus. Dans aucun cas, une transformation de la variable dépendante originale n'a été nécessaire pour que la distribution des résidus respecte ces postulats.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1 Effectuer la caractérisation biochimique de la FSLP_c sur la base de ses contenus en nutriments majeurs et mineurs, en carbone et en éléments traces métalliques

3.1.1 Nutriments majeurs et mineurs

Suite à son conditionnement par aération, la FSLP_c atteint un taux élevé de matières sèches (59 %) et présente une structure aérée et floconneuse très favorable en vue d'une éventuelle reprise ou transformation (figure 1). Les résultats de caractérisation démontrent aussi qu'elle devient un produit concentré (tableau 2). Ainsi, la FSLP_c contient, par tonne fraîche des concentrations beaucoup plus grandes que le lisier brut pour une majorité d'éléments, ce qui est conséquent au retrait d'une grande quantité de l'eau qui compose 97 % du lisier frais (tableau 2). Les éléments les plus augmentés sont le C, le N_{tot} et P_{tot}, le K, le Ca et le Mg. Ainsi, l'application d'une seule tonne fraîche de FSLP_c apporte en moyenne au sol 366 kg de MO (183 kg C). Ceci revêt une grande importance puisque l'apport de MO améliore la porosité et le pouvoir de rétention en eau des sols, ce qui favorise l'enracinement des plantes et donc leur approvisionnement en eau et en éléments nutritifs. L'apport de MO promeut aussi l'activité des

microorganismes utiles du sol et la présence des vers de terre (Estevez et coll. 1992, N'Dayegamiye et coll. 2004b). Conjointement, l'apport en N-P-K totaux passe respectivement de 3, 0,8 et 1 kg t⁻¹ (b.h.) pour le lisier à 34, 35 et 9 kg t⁻¹ (b.h.), en moyenne, pour la FSLP_c. De prime abord, la FSLP_c semble donc riche en nutriments majeurs et ainsi posséder des caractéristiques fertilisantes, en plus d'être une bonne source de C.

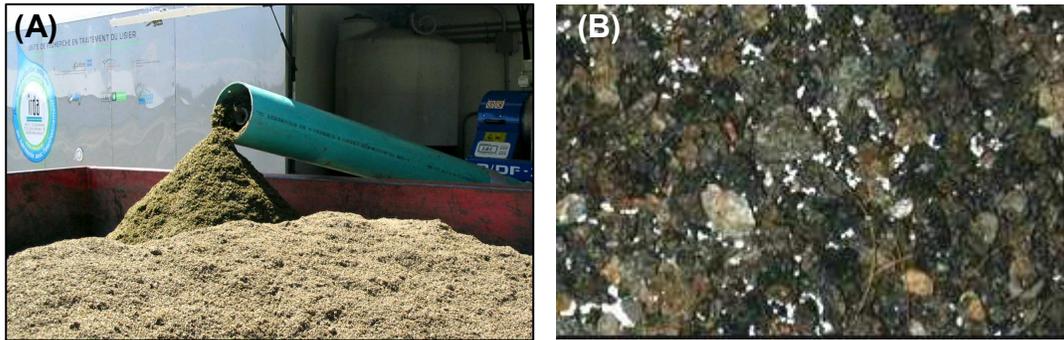


Figure 1 : La FSLP_c (A) à la sortie du séparateur décanteur centrifuge et (B) suite à son conditionnement par aération.

Tableau 2. Caractéristiques agronomiques du lisier de porcs et de la FSLP_c en base humide telle qu'épandue au champ en 2007 et 2008.

Année	MS ¹	C _{tot}	C _{eau}	C/N	N _{tot}	N-NH ₄	N-NO ₃	N _o	P _{HCl}	P _{eau}	P _{tot}	K	Ca	Mg
	---%---													
Lisier ²	3,3	12	-	4,3	3	1,4	-	2	-	-	0,8	1	1	0,5
2007	53	164	11	5,4	30	0,8	0,51	29	27	0,80	30	8	18	22
2008	65	202	25	5,4	38	2,7	0,01	35	36	0,82	40	10	24	26
Facteur de variation ³		15	-	1	11	1	-	16	-	-	44	9	21	48

¹ Masse sèche sur base humide.

² Valeurs moyennes d'analyse du lisier de l'entreprise ayant fourni le matériel à centrifuger.

³ Variation entre la moyenne des valeurs de composition des FSLP_c de 2007 et 2008 et les valeurs du lisier.

Lors de la séparation et du conditionnement, certains éléments ont cependant été plus concentrés et/ou perdus que d'autres. Ainsi, les éléments originellement présents sous forme dissoute dans le lisier auront tendance à rester dans la fraction liquide, tandis que les éléments particulaires et ceux liés à la MO se retrouveront préférentiellement dans la FSLP_c. Par exemple, la teneur en K passe de 3,1 % (b.s.) dans le lisier brut à 1,6 % (b.s.) dans la FSLP_c (tableau 3). À l'opposé, le Mg passe de 1,3 % dans le lisier brut à 4,1 % en moyenne dans la FSLP_c. Le P_{tot}, présent majoritairement sous forme particulaire, voit aussi sa concentration de 2,4 % dans le lisier brut, augmenter à 6 % en moyenne dans la FSLP_c. Dans le cas du N_{tot}, non seulement les formes minérales dissoutes (NO₃ et NH₄) sont-elles restées principalement dans la fraction liquide, mais lors du conditionnement, une partie du N minéral tend à être perdue par volatilisation. Conséquemment, la teneur en N_{tot} du lisier brut, de 8,5 % (b.s.), s'abaisse à 5,8 % (b.s.) dans la FSLP_c. De même, le contenu en N-NH₄ s'abaisse de 4,1 % (b.s.) dans le lisier, à 0,28 % (b.s.) dans la FSLP_c. Ces variations différentielles entraînent des changements majeurs de plusieurs ratios d'éléments qui conditionnent le coefficient d'efficacité (CE) fertilisante des AEOs et orientent leur valorisation (tableau 4).

Tableau 3. Caractéristiques agronomiques (b.s.) du lisier de porcs et de la FSLP_c utilisée en 2007 et 2008.

Année	MS ¹	MO	C _{tot}	C _{eau}	C/N	N _{tot}	N-NH ₄	N-NO ₃	N _o	P _{HCl}	P _{eau}	P _{tot}	K	Ca	Mg
	----- %								kg T ⁻¹						
Lisier²	3,3	71	357	-	4,3	85	41	-	44	-	-	24	31	33	13
2007	53	62	312	21	5,4	58	1,4	0,98	55	52	1,5	57	16	34	42
2008	65	62	310	39	5,4	58	4,1	0,01	54	55	1,3	62	16	36	40

¹ Masse sèche sur base humide.² Valeurs moyennes d'analyse du lisier de l'entreprise ayant fourni le matériel à centrifuger.**Tableau 4.** Ratios des critères agronomiques du lisier brut et de la FSLP_c utilisée en 2007 et 2008.

Année	$\frac{C_{eau}}{C_{tot}}$	$\frac{N_o}{N_{tot}}$	$\frac{(N-NO_3 + N-NH_4)}{N_{tot}}$	$\frac{N-NH_4}{N_{tot}}$	$\frac{P_{HCl}}{P_{tot}}$	$\frac{C_{tot}}{N_{tot}}$	$\frac{N_{tot}}{P_2O_5}$	$\frac{K}{(Ca+Mg)}$
	----- %							
Lisier	-	52	49	49	-	4,3	1,5	0,68
2007	7	96	4	2	92	5,4	0,45	0,23
2008	13	93	7	7	88	5,4	0,41	0,21

Note : Les données du tableau ont été utilisées pour le calcul des ratios.

Premièrement, le rapport N_o/N_{tot} , qui indique que 52 % du N est sous une forme minérale dans le lisier, révèle que près de 100 % du N_{tot} de la FSLP_c est sous forme organique (tableau 4). Le N de la FSLP_c devra donc être minéralisé pour devenir disponible aux plantes. De plus, dans le lisier, 49 % du N_{tot} est sous forme de N-NO₃ et N-NH₄, directement assimilables par la culture, comparativement à 5,5 % en moyenne dans la FSLP_c (tableau 4). Puisque pour le lisier de porcs, il a été prouvé que le ratio $N-NH_4/N_{tot}$ est directement corrélé ($r = 0,98$) au CE du N_{tot} du lisier, constituant une mesure valable permettant de mieux préciser la disponibilité du N selon les caractéristiques du produit organique (Giroux et coll. 2000a), la baisse de ce ratio à 4,5 % en moyenne pour la FSLP_c indique que le CE du N_{tot} y sera diminué par rapport celui du N du lisier. Toutefois, le fait que le C/N de la FSLP_c demeure bas indique que le N_o sera tout de même facilement minéralisé. Les cycles du C et du N sont en effet intimement liés et le C/N permet donc d'estimer *a priori* si, une fois ajouté au sol, un AEO a tendance à entraîner l'immobilisation du N ou sa libération par minéralisation. Un $C/N > 20$ signifie que la faible proportion de N limitera l'activité microbienne, responsable de la minéralisation du C, et pourra même entraîner l'immobilisation du N si les microorganismes doivent s'accaparer le N minéral du sol et des engrais pour hâter la décomposition des biomasses (tableau 5). À l'opposé, les AEOs ayant des rapports $C/N < 20$ se minéraliseront rapidement et libéreront en peu de temps des quantités importantes de N disponible aux cultures (Bipfubusa et coll. 2006) (tableau 5).

Tableau 5. Relation entre le rapport C/N des résidus organiques, la minéralisation et la disponibilité de l'azote pour les plantes.

C/N	Niveau de minéralisation	Disponibilité de l'azote
< 10	Forte minéralisation	Élevée à très élevée
10-20	Bonne minéralisation	Bonne à élevée
20-60	Faible minéralisation	Faible à très faible
60-100	Faible immobilisation	Très faible à négative
> 100	Forte immobilisation	Négative

Adapté de CRAAQ (2003).

Le CE du N des AEOs peut donc être modulé en calculant un CE modifié pour la fraction organique du N (CEFO) (tableau 6). Plus le C/N sera bas, plus le CEFO sera révisé à la hausse. Avec une valeur de C/N de 5,4, le CE du N de la FSLP_c devrait donc demeurer relativement intéressant pour un AEOs, d'autant plus que 10 % de son C_{tot} est sous forme de C soluble à l'eau (C_{eau}), une forme très disponible (tableau 4). De plus, l'analyse sur base sèche indique que peu de C a été perdu lors du conditionnement. Ceci concorde avec les travaux de Martin et coll. (2006) qui suggéraient que la FSLP_c générée par le conditionnement ne soit pas un compost. Ainsi, bien que l'aération ait forcé le produit à chauffer quelques jours, la baisse rapide du contenu en eau a bloqué le compostage. La FSLP_c conserve donc en bonne partie le C facilement minéralisable qui serait autrement perdu sous forme de CO₂. Incidemment, à l'opposé des composts qui sont des produits stables ne contenant plus que les formes de C plus humifiées (résistantes à la minéralisation), la FSLP_c doit plutôt être considérée comme un AEOs probablement encore grandement réactif lorsqu'ajouté au sol puisqu'il est bien pourvu en C labile.

Tableau 6. Coefficient d'efficacité de l'azote total (CE) et de la fraction organique (CEFO) des engrais de ferme en 1^{ère} année selon leur rapport C/N.

Rapport C/N	CE ajusté (%)	CEFO ajusté (%)
30-35	10	8
25-30	20	16
20-25	30	20
15-20	40	25
10-15	50	30
5-10	60	35
< 5	70	40

Adapté de CRAAQ (2003).

Deuxièmement, le rapport N_{tot}/P_{tot} a diminué de 4 fois, faisant en sorte que pour chaque kg de N_{tot} apporté par l'application de FSLP_c, 1 kg de P_{tot} est aussi ajouté (tableau 4). Ce nouveau rapport N_{tot}/P_{tot} s'est ainsi éloigné du ratio N/P des prélèvements de la plupart des cultures qui varie de 4 à 8 (Mazzarino et coll. 1998). La valorisation de la FSLP_c ne peut donc aucunement se faire sur la base des besoins en N des cultures car cela entraînerait un dépassement important des doses de P nécessaires et réglementaires et conduirait à un enrichissement des sols en P. À long terme, cette accumulation pourrait entraîner des pertes accrues de P par ruissellement et écoulement préférentiel. La FSLP_c est donc bien adaptée pour fertiliser les cultures en sols pauvres en P, mais le tonnage applicable sera limité sur les sols riches en P où un ratio N/P minimal de 7 est suggéré afin d'éviter l'enrichissement du sol en P Mehlich-3 (Ritter 2000). Cette limitation sera renforcée par le fort contenu en P_{tot} de la FSLP_c, lequel atteint en moyenne 35 kg t⁻¹ fraîche, d'autant plus que le ratio P_{HCl}/P_{tot} montre que 90 % du P y est sous forme minérale. Un taux similaire de 12 % de P_o/P_{tot} pour un solide de lisier de porcs (SLP) centrifugé est rapporté par Demers (2008). Selon la littérature, le P minéral des lisiers de porcs est principalement sous forme d'ions phosphates HPO₄ et H₂PO₄, très disponibles, provenant des urines. Bien que ces ions demeurent en partie dissous dans la phase liquide des lisiers, une partie se retrouve adsorbée sur la MO et sera concentrée dans la fraction solide des lisiers avec les phosphates de calcium

(CaHPO₄) provenant des fèces (Gracian 2000). Le fort contenu en P minéral mesuré dans la FSLP_c est donc probablement constitué de ces éléments. Le P_{tot} devrait donc être efficace, même si seulement 2 % du P_{tot} est sous la forme la plus disponible, soit le P soluble à l'eau (P_{eau}) (tableau 3). D'autant plus que le rapport C/P de moins de 1, est très en-dessous de la norme C/P > 120 au-delà de laquelle l'application d'un AEO entraîne une immobilisation du P du sol (Barker 1997).

Enfin, une attention particulière devra être apportée à la fertilisation en K puisque le ratio K/(Ca+Mg) est fortement diminué. D'une part, le K majoritairement sous forme soluble dans le lisier brut, s'est retrouvé principalement dans la fraction liquide. Béline et coll. (2003) rapportent également une répartition similaire avec un taux de récupération du K de seulement 8 % dans la fraction solide de lisier centrifugé. À l'opposé, le Ca et le Mg se concentrent dans la fraction solide (tableau 4). Ainsi, bien que le K se soit accru d'un facteur 9 dans la FSLP_c, dû à la diminution du contenu en eau lors des étapes de séparation et de conditionnement, les contenus en Ca et Mg ont pour leur part augmenté de 21 et 48 fois, respectivement (tableau 2). Puisque l'absorption du K et du Ca et Mg sont antagonistes, i.e. en compétition, une présence trop grande de Ca et Mg peut entraîner une diminution du prélèvement en K par la culture. Une telle situation a été rapportée dans le cadre d'études portant sur la substitution de la fertilisation NPK minérale de base par des apports jugés équivalents de FSLPs centrifugées dans la culture du blé (Vasconcelos et coll. 1999), du maïs ensilage (Vasconcelos et Cabral 1996) et du trèfle (Torres et Vasconcelos 1996). Les sols utilisés étaient cependant déficients en K, ce qui est rarement le cas au Québec. Une telle déficience serait donc à surveiller, particulièrement dans la culture des plantes fourragères puisqu'un prélèvement insuffisant de K cause une diminution des teneurs en sucres solubles des fourrages, accompagnée d'une forte hausse de leur teneur en nitrates (Giroux et coll. 2000b). Ainsi, si d'un côté les teneurs élevées en Ca et Mg sont bénéfiques pour la nutrition des cultures et pour enrichir les sols carencés en ces éléments, le déséquilibre entre les éléments cationiques demandera une attention particulière dans les plans de fertilisation pour l'apport de K, d'autant plus que les sols seront pauvres en K.

Le tableau 7 présente une compilation de la composition en éléments majeurs et mineurs, sur base sèche, de divers AEOs selon une revue exhaustive des études menées avec des produits organiques générés au Québec, incluant les récents documents de référence portant sur la caractérisation des effluents liquides d'élevages (Seydoux et coll. 2005) et de poulettes et poules pondeuses (Seydoux et coll. 2007). Évidemment, cette comparaison concerne les contenus totaux des éléments et ne peut servir de comparable direct pour évaluer l'efficacité fertilisante des produits. Cette comparaison sera donc reprise plus loin en tenant compte des CE du N et P de divers AEOs testés au Québec. Néanmoins, il demeure pertinent de pouvoir situer le nouvel AEO qu'est la FSLP_c en termes de composition chimique, par rapport à des engrais de ferme et amendements organiques avec lesquels les conseillers agricoles et l'industrie sont habitués de travailler. Par exemple, la FSLP_c présente une richesse en N_{tot} peu fréquente. En fait, seuls les lisiers de porcs bruts contiennent vraiment plus de N_{tot}. Même les fumiers de poulettes et de poules pondeuses, reconnus pour leur fort contenu azoté, ne surclassent pas la FSLP_c. Dans le cas du P, le contraste est encore plus grand puisque globalement, la FSLP_c contient de 2 à 200 fois plus de P_{tot} que les autres AEOs listés. Même les teneurs en P des lisiers de porcs bruts, les plus élevées après celle de la FSLP_c, ne valent que la moitié de celle-ci. Une telle hausse des concentrations en P est bénéfique en regard du fort contenu en C de la FSLP_c. En effet, à l'instar du rapport C/N qui renseigne sur le risque d'immobilisation du N, le rapport C/P est utilisé pour

prédire le risque d'immobilisation du P du sol suite à l'épandage d'un produit organique contenant beaucoup de C. Ainsi, d'après Barker (1997), un amendement organique avec un rapport C/P supérieur à 120 entraînerait une immobilisation du P du sol. Avec un rapport C/P de 5, le P devrait donc être grandement disponible. Pour le K, tel qu'attendu, plusieurs AEOs présentent des valeurs plus grandes. En fait, la majorité des AEOs provenant des engrais de ferme surpasse la FSLP_c pour cet élément. Par contre, les composts de résidus ménagers et de résidus verts, les boues de papetières (mixtes, primaires et secondaires), ainsi que les boues municipales (d'étangs et de stations mécanisées) contiennent beaucoup moins de K que la FSLP_c, avec des valeurs entre 0,5 et 7 kg K t⁻¹ (b.s.), comparativement à 16 kg K t⁻¹ (b.s.) pour la FSLP_c.

Tableau 7. Comparaison des propriétés agronomiques (b.s.) de divers produits organiques.

Produits organiques	MS ¹	MO	C _{tot}	N _{tot}	P _{tot}	K	Ca	Mg	C/N	$\frac{N-NH_4}{N_{tot}}$	$\frac{N}{P}$	$\frac{K}{(Ca+Mg)}$
	----- % -----				kg T ⁻¹					(%)		
Boues mixtes de papetières ²	29	78	391	27	4	1,4	28	0,8	14	4	7	0,05
Boues mixtes de papetières ³	40	78	389	18	5	1,7	26	1	22	9	7	0,06
Boues mixtes de papetières ⁴	33	82	410	29	5	1,5	23	12	14	-	6	0,04
Boues mixtes de papetières ⁵	19	90	450	45	3	1,4	-	-	10	-	15	-
Boues primaires de papetières ⁶	44	65	325	1,5	0,3	0,5	53	1	217	-	4	0,01
Boues secondaires de papetières ⁷	2	74	370	55	6	5,4	9	2	7	-	9	0,50
Boues de stations mécanisées ⁸	21	66	330	44	17	2,5	15	4	9	9	3	0,13
Boues d'étangs ⁸	5,0	42	210	22	20	1,7	27	6	10	13	1	0,05
Lisier de porcs – croissance ⁹	3,5	72	359	100	23	50	24	12	4	56	4	1,39
Lisier de porcs – maternité ⁹	2,6	73	363	110	33	47	45	14	3	64	3	0,81
Lisier de porcs – pouponnière ⁹	2,3	60	302	112	30	76	34	14	3	54	4	1,60
Fumier de veaux ⁵	39	80	399	37	8	20	-	-	29	5	5	-
Fumier de bovins ⁴	18	82	410	26	8	17	11	5	16	-	3	0,27
Fumier de bovins de boucherie ¹⁰	29	77	387	20	7	11	-	-	19	16	3	-
Fumier de bovins laitiers ¹⁰	16	87	435	32	5	21	-	-	14	31	6	-
Fumier composté bovins boucherie ⁵	38	81	403	59	11	28	-	-	18	12	5	-
Fumier poulettes ¹¹	76	80	398	46	20	24	42	6	9	13	2	0,50
Fumier poules pondeuses ¹¹	83	65	325	33	19	21	84	5	10	10	2	0,24
Composts de fumier ¹²	45	50	250	10	7	7	44	4	25	11	1,4	1,50
Composts de résidus verts ¹²	50	50	250	9	3	5	30	4	28	7	3	0,15
Compost de résidus ménagers ¹³	62	87	436	18	2	6	24	3	24	2	9	0,22
Compost de résidus ménagers ¹³	65	76	380	12	2	6	31	2	32	0,1	6	0,18
Compost de résidus ménagers ¹³	62	74	368	11	3	7	80	3	33	-	4	0,08

¹ Masse sèche sur base humide.

² Adapté de N'Dayegamiye et coll. (2003b). Valeurs moyennes des teneurs rapportées pour les boues de papetières (n = 3).

³ Adapté de N'Dayegamiye (2006). Valeurs moyennes des teneurs rapportées pour les boues de papetières (n = 2).

⁴ Adapté de N'Dayegamiye et coll. (2004b).

⁵ Adapté de Giroux et coll. (2007). Valeurs moyennes des teneurs rapportées pour les boues de papetières (n = 2).

⁶ Adapté de Hébert et Beaulieu (2002).

⁷ Adapté de Beauchamp et coll. (1998).

⁸ Adapté de Perron et Hébert (2007a).

⁹ Adapté de Seydoux et coll. (2005). Pour les porcs en croissance, la valeur présentée est la moyenne des valeurs C-2.

¹⁰ Adapté de N'Dayegamiye et coll. (2004a).

¹¹ Adapté de Seydoux et coll. (2007).

¹² Analyses des produits en vrac de GSI Environnement. Composts de résidus verts no. 212002 et compost de fumier no. 201002.

¹³ N'Dayegamiye et coll. (2005).

Dans le cas des éléments mineurs, si la FSLP_c présente une teneur moyenne en Ca comparable à celle des autres AEOs, son contenu en Mg est de loin le plus élevé, avec une valeur de 3 à 50 fois plus grande (tableaux 3 et 7). Inversement, avec les lisiers de porcs bruts, la FSLP_c présente un des C/N les plus basles autres AEOs présentant rapidement des ratios plus élevés, jusqu'à 6 fois plus grands. Ainsi, la FSLP_c possède à la fois un des contenus en N_{tot} les plus intéressants et un des C/N les plus bas. Ceci laisse présager d'une nature fertilisante azotée compétitive par rapport aux autres AEOs dont le N_{tot} est principalement sous forme organique. Au niveau des autres ratios, les rapports N-NH₄/N_{tot} et N/P sont parmi les plus faibles, tandis que le rapport K/(Ca+Mg) est intermédiaire. En fait, ce ratio suit la tendance observée pour le K, i.e. que tous les AEOs provenant d'engrais de ferme surpassent la FSLP_c pour ce rapport.

Tableau 8. Comparaison des propriétés agronomiques (b.s.) de diverses FS de lisier de porcs.

Fraction solide de lisier de porcs	MS ¹	MO	C _{tot}	N _{tot}	P _{tot}	K	Ca	Mg	C/N	$\frac{N-NH_4}{N_{tot}}$	$\frac{N}{P}$	$\frac{K}{(Ca+Mg)}$
	----- % -----		----- kg T ⁻¹ -----							(%)		
FSLP non compostée ²	-	71	414	17	-	-	-	-	24	5	-	-
FSLP tamis non compostée ³	-	-	416	19	16	6	13	6	21	-	1,2	0,33
FSLP tamis compostée ³	-	-	428	16	10	8	27	5	27	-	1,6	0,24
FSLP centrifugée non compostée ⁴	25	69	345	34	27	6	33	16	10	33	1,3	0,12
FSLP centrifugée non compostée ⁵	17	45	224	34	48	9	55	38	7	3	0,7	0,10
FSLP centrifugée non compostée ⁶	26	62	312	28	32	5	33	28	11	56	0,9	0,09
FSLP centrifugée non compostée ⁷	32	77	383	33	28	7	-	-	11	-	1	-
FSLP centrifugée non compostée ⁸	-	-	334	27	36	3	36	16	12	-	0,8	0,06
FSLP vis sans fin non compostée ⁸	-	-	363	29	27	6	42	10	13	-	1,1	0,12
FSLP compaction non compostée ⁹	-	-	320	-	16	7	13	-	-	-	-	-
FSLP compaction compostée ⁹	-	-	329	-	10	6	26	-	-	-	-	-

¹ Masse sèche sur base humide.

² Adapté de Cordovil et coll. (2005). Fabrication mécanique non détaillée et ajout pour le compostage non rapporté.

³ Adapté de Moral et coll. (2006a). La FSLP compostée a été mélangée avec 20 % paille + 2 % résidus verts + 0,8 L lisier de porcs.

⁴ Adapté de Cabral et coll. (1998) et Vasconcelos et coll. (1997).

⁵ Adapté de Vasconcelos et coll. (1999).

⁶ Adapté de Vasconcelos et Cabral (1996).

⁷ Béline et coll. (2003).

⁸ Adapté de Akpakouma (2009). FSLPs obtenues à l'état pâteux et séchées passivement 3 mois dans des serres ventilées.

⁹ Adapté de Guerrero et coll. (2007). Compostage de deux mois avec de la paille.

La comparaison de la FSLP_c avec d'autres FSLPs du même type est difficile puisque très peu d'études sur la caractérisation des fractions solides de lisier traité ont été publiées. L'information existante est encore moindre si l'on se restreint aux études québécoises ou ayant traité les lisiers par centrifugation. L'industrie possède peut-être de telles études, mais leur accessibilité est réduite. Le tableau 8 regroupe donc les études ayant été trouvées dans la littérature qui portent sur la caractérisation de FSLPs, compostées ou non, produites par des moyens mécaniques de séparation et qui ne sont donc pas des MRFs. Plusieurs études viennent de France et d'Italie, deux pays très actifs dans le traitement des lisiers de porcs, et il est fort probable que les conditions d'élevage, tels la nutrition des porcs ou l'entreposage, diffèrent de celles du Québec. Toutefois, des constantes se dégagent dans la composition des différentes FSLPs produites. Ainsi, les FSLPs présentent une forte proportion de C, avec des apports allant de 224 à 428 kg C t⁻¹ (b.s.). Leur contenu en N_{tot} vaut au moins 16 kg t⁻¹ (b.s.), et toutes les FSLPs obtenues par centrifugation, aucune n'ayant été compostée, possèdent des valeurs de N_{tot} d'environ 30 kg t⁻¹ (b.s.) ou plus, ce qui les placent au-dessus de la majorité des composts de

résidus ménagers et de résidus verts, des boues de papetières (mixtes et primaires), ainsi que des boues municipales (d'étangs et de stations mécanisées) (tableau 7). Les FSLPs centrifugées sont aussi celles présentant globalement les plus fortes teneurs en P_{tot} et en Mg, allant jusqu'à 48 et 38 kg t^{-1} (b.s.), respectivement. Dans l'ensemble, la composition des FSLPs centrifugées concorde avec les résultats que nous avons obtenu pour la FSLP_c étudiée. L'étape de conditionnement utilisée pour stabiliser la FSLP_c semble cependant avoir été avantageuse comparativement au compostage traditionnel puisque la FSLP_c possède le plus bas C/N, dû principalement à la conservation d'une partie significative du N présent dans le produit fraîchement séparé.

3.1.2 Éléments traces métalliques

Puisque la FSLP_c n'est pas une MRF, sa valorisation n'a pas à se conformer à la réglementation du ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP) qui régit l'utilisation agronomique des MRFs. En effet, la FSLP_c présente l'avantage de ne pas être une MRF car aucun produit n'est ajouté durant le traitement du lisier. Elle est donc associée aux déjections animales (fumiers) et autres « engrais de ferme » qui, de façon administrative, ne sont pas considérés comme des MRFs, bien que ces matières soient résiduelles et comportent des propriétés d'engrais et d'amendement des sols (Hébert 2008). Cependant, dans une optique de développement durable, il demeure essentiel d'être sensibilisé au devenir des ÉTMs dans les sols agricoles puisqu'un enrichissement excédant la capacité de rétention du milieu récepteur pourrait provoquer de la phytotoxicité pour les cultures et hausser les risques de pollution diffuse dans l'environnement. Ce questionnement est d'autant plus pertinent qu'en production porcine, d'importants suppléments de cuivre (Cu) et de zinc (Zn) sont ajoutés à l'alimentation des porcs comme facteurs de croissance et agents antimicrobiens (Kessler et coll. 1994). Comme les taux de rétention du Cu et du Zn par l'animal ne sont que de l'ordre de 5-20 % (Unwin 1977), la majorité des apports se retrouve dans le lisier. De plus, plusieurs études rapportent que lors de la séparation des phases du lisier, plus de 95 % des ÉTMs se retrouvent dans la fraction solide (Moral et coll. 2006b) puisque ceux-ci sont le plus souvent liés à la MO.

Tableau 9. Composition (b.s.) en ÉTMs du lisier brut et de la FSLP_c épandue au champ en 2007 et 2008.

Année	MS ¹	Al	Cu	Fe	Mn	Zn
	----- % -----					
	----- mg kg ⁻¹ -----					
Lisier²	3,3	991	1051	3273	691	2402
2007	53	2190	381	4175	1077	1329
2008	65	1512	494	3318	1265	1496

¹ Masse sèche sur base humide.

² Valeurs moyennes d'analyse du lisier de l'entreprise ayant fourni le matériel à centrifuger.

Curieusement, dans le cas présent, les analyses sur base sèche révèlent que les quantités de Cu et de Zn sont réduites d'un facteur 2,4 et 1,7, respectivement, dans la FSLP_c par rapport au lisier brut (tableau 9). Une partie importante du Cu et du Zn serait donc restée dans la fraction liquide, probablement liée au carbone organique dissous (COD). D'une part, des études menées sur la partie liquide d'un lisier de porcs entreposé depuis 6 mois et sur la fraction liquide de lisier centrifugé ont démontré que la partie liquide des lisiers contient la grande majorité du COD (Giusquiani et coll. 1998, Gigliotti et coll. 2002) puisque les éléments dissous ne sont pas affectés

par la centrifugation, ni la décantation. D'autre part, il est reconnu que le Cu et le Zn présents dans les lisiers de porcs se complexent facilement au COD (Del Castilho et coll. 1993, Businelli et coll. 1999, Jackson et coll. 2003). Cette partie, fixée au COD, devient donc non récupérable par centrifugation. Les récents travaux de Béline et coll. (2003) sont en accord avec nos observations. Ceux-ci rapportent que suite à la centrifugation du lisier, seuls 30-50 % du Cu et du Zn ont été récupérés dans la fraction solide. Ainsi, bien que comparativement aux contenus en Cu et Zn des principaux engrais commerciaux, la FSLP_c (b.s.) contienne beaucoup plus de ces éléments (tableau 10), les teneurs résiduelles en Cu et Zn (b.s.) placeraient tout de même la FSLP_c dans la catégorie C2, selon les critères de valorisation des MRFs (Hébert 2008) (tableau 11). Sur la base du contenu en Cu, en moyenne de 438 mg kg⁻¹ (b.s.), la FSLP_c serait même tout près de se classer dans la catégorie C1. C'est donc le Zn, avec une valeur moyenne de 1 413 mg kg⁻¹ (b.s.), soit le double de la limite supérieure de la catégorie C1, qui placerait la FSLP_c dans la catégorie C2. De son côté, le lisier, qui n'a pas non plus à rencontrer les teneurs limites des MRFs, surpasserait légèrement la norme C2 pour le Cu et rencontrait le critère C2 pour le Zn uniquement grâce à son contenu en P₂O₅ (b.s.) > 2,5 % (tableaux 9 et 11). Toutefois, puisque la richesse en Cu et Zn, tant du lisier que de la FSLP_c, est due aux apports alimentaires en ces éléments, une réduction à la source de ces ÉTMs solutionnerait cet état de fait. Parmi les autres ÉTMs mesurés, l'aluminium (Al) et le manganèse (Mn) sont ceux dont les teneurs ont le plus augmenté, avec des hausses similaires de 100 %. À l'opposé, le fer (Fe) présente des concentrations très proches de celles du lisier (tableau 9). Quoi qu'il en soit, ces ÉTMs font partie des paramètres non retenus pour l'établissement des teneurs limites. Ces éléments comprennent l'Al, le Fe, le bore (B), le Mn, le sodium, le pH et le baryum (Hébert 2008).

Tableau 10. Concentrations (b.s.) en ÉTMs de divers engrais minéraux commerciaux.

Engrais	Cu (mg/kg)	Mn (mg/kg)	Zn (mg/kg)
Nitrate d'ammonium	0,0	6,2	1,4
Urée	12,3	1,1	2,8
Phosphate bi-ammoniacal	5,9	356	67,1
Superphosphate triple	7,3	253	66,5
Chlorure de potassium	1,7	1,4	1,0
Sul-po-mag	0,2	9,3	1,6

Adapté de Giroux et coll. (2004).

L'analyse sur base fraîche démontre cependant que, dû au retrait d'une grande partie de l'eau lors de la centrifugation, la FSLP_c humide apporte par tonne appliquée beaucoup plus de ÉTMs que le lisier. Cependant, sur la base des besoins en P des cultures, des quantités beaucoup moins grandes de FSLP_c que de lisier doivent être épandues. En fait, par rapport aux ratios entre les contenus en P_{tot} et les teneurs en ÉTMs, la FSLP_c présente des proportions beaucoup plus intéressantes que le lisier. Alors que le contenu en P_{tot} (b.h.) a été augmenté d'un facteur 44 par le traitement du lisier, les teneurs en Cu et Zn n'ont été augmentées que d'un facteur 8 et 11, respectivement (tableau 12). Le ratio P₂O₅/(Cu+Zn), qui est de 16 dans le lisier, passe donc à une valeur moyenne de 73 pour la FSLP_c (tableau 12). Ainsi, moins de Cu et de Zn sont apportés par

kg de P fourni à la culture. Sur la base du respect préconisé, mais non réglementé, du non dépassement d'apport de 1 kg Cu et de 3 kg Zn ha⁻¹ an⁻¹, un apport de 285 kg de P₂O₅ total pourrait être atteint. Si, comme pour la plupart des engrais de ferme, le CE du P de la FSLP_c se situe au minimum à 80 % (CRAAQ 2003), 228 kg de P₂O₅ efficace pourraient ainsi être fournis par cet apport. Cette dose dépasse largement les besoins en P₂O₅ de la majorité des cultures (CRAAQ 2003), ce qui laisse donc une grande flexibilité d'utilisation de la FSLP_c. D'autant plus que la limite de charge réglementaire des AEOs de catégorie C2 est de 22 t (b.s.) ha⁻¹ an⁻¹, ce qui est amplement supérieur aux quantités nécessaires à une fertilisation basée sur les besoins en P. L'analyse sur base humide démontre aussi que le ratio N/(Cu+Zn) s'est amélioré pour la FSLP_c, passant de 25 dans le lisier, à 32 dans la FSLP_c (tableau 12).

Tableau 11. Teneurs limites (b.s.) en ÉTMs des MRFs.

Contaminants	Unités	Teneurs limites	
		Catégorie C1 ⁽¹⁾	Catégorie C2 ^(1,2)
Éléments considérés essentiels ou bénéfiques aux plantes ou aux animaux			
Arsenic	mg/kg, base sèche	13	41
Cobalt	mg/kg, base sèche	34	150
Chrome	mg/kg, base sèche	210	1 060
Cuivre	mg/kg, base sèche	400	1 000 ⁽³⁾
Molybdène	mg/kg, base sèche	5	20
Nickel	mg/kg, base sèche	62	180
Sélénium	mg/kg, base sèche	2,0	14
Zinc	mg/kg, base sèche	700	1850 ⁽⁴⁾
Contaminants stricts			
Cadmium	mg/kg, base sèche	3,0	10 ⁽⁴⁾
Mercuré	mg/kg, base sèche	0,8	4
Plomb	mg/kg, base sèche	150	300
Dioxines et furannes	ng EQT/kg (base sèche) ⁽⁵⁾	17	50 ⁽⁶⁾

- (1) Pour être considéré de catégorie C1, tous les paramètres doivent respecter les critères C1. Pour être considéré de catégorie C2, tous les paramètres doivent respecter les critères C2 et au moins un paramètre doit excéder le critère C1. Si on n'exige pas d'analyse pour un contaminant chimique selon le tableau 6.1, la teneur est réputée être inférieure à la limite C1. La classification se base sur la valeur moyenne des analyses réalisées au cours des 12 derniers mois.
- (2) La limite de charge des résidus C2 est de 22 t (b.s.)/ha/5 ans.
- (3) La teneur limite est portée à 1 500 mg Cu/kg pour les résidus avec > 2,5 % P₂O₅, b.s., et pour les biosolides municipaux provenant d'étangs.
- (4) Les ACM dont le ratio PN/Zn > 0,027 ou le ratio PN/Cd > 2,5 (%ÉCC/ mg métal/kg) sont également considérés C2, suivant les critères de la norme BNO (2005) sur les ACM.
- (5) Équivalents toxiques internationaux (EQT) de l'OMS.
- (6) Une MRF contenant entre 51 et 100 ng EQT/kg de dioxines et de furannes peut faire l'objet d'une valorisation non agricole.

Adapté de Hébert (2008).

Tableau 12. Composition et ratios en ÉTMs du lisier de porcs brut et de la FSLP_c en base humide telle qu'épandue au champ en 2007 et 2008.

Année	MS ¹	Al	Cu	Fe	Mn	Zn	$\frac{N}{Cu + Zn}$	$\frac{P_2O_5}{Cu + Zn}$
	----- % -----							
Lisier²	3,3	0,033	0,035	0,109	0,023	0,080	25	16
2007	53	1,154	0,201	2,200	0,568	0,700	34	76
2008	65	0,986	0,322	2,163	0,825	0,975	29	71
Facteur de variation³		32	8	20	30	11		

¹ Masse sèche sur base humide.

² Valeurs moyennes d'analyse du lisier de l'entreprise ayant fourni le matériel à centrifuger.

³ Variation entre la moyenne des valeurs de composition des FSLP_c de 2007 et 2008 et les valeurs du lisier.

Le tableau 13 présente une compilation de la composition en ÉTMs sur base sèche de divers AEOs générés au Québec, incluant les récents documents de référence portant sur la caractérisation des effluents liquides d'élevages de porcs (Seydoux et coll. 2005) et solides de poulettes et poules pondeuses (Seydoux et coll. 2007). Avec une valeur moyenne de 438 mg kg⁻¹ (b.s.), la FSLP_c est un des AEOs présentant le plus haut taux de Cu, avec les lisiers de porcs et les boues municipales (étangs et stations mécanisées), la plupart des fumiers et des boues de papetières ayant des contenus en Cu beaucoup plus faibles. En fait, exception faite des boues d'étangs étudiées par Perron et Hébert (2007b), tous les AEOs présentés au tableau 13 rencontrent le critère C1, excepté les lisiers de porcs et la FSLP_c. Pour les contenus en Zn, seuls les lisiers de porcs présentent des teneurs similaires à la concentration moyenne, sur les 2 années, de 1 413 mg Zn kg⁻¹ (b.s.) de la FSLP_c. En fait, les valeurs en Zn de tous les autres AEOs sont beaucoup plus basses, soit moins de 50 %, et elles respectent toutes le critère C1.

Tableau 13. Composition (b.s.) en ÉTMs de divers produits organiques.

Produits organiques	MS ¹	Al	Cu	Fe	Mn	Zn
	--- % ---			mg kg ⁻¹		
Boues de stations mécanisées ²	-	-	402	-	-	398
Boues d'étangs ²	-	-	680	-	-	689
Boues de fosses septiques ²	-	-	246	-	-	418
Boues mixtes de papetières ³	32	-	49	2547	247	81
Boues mixtes de papetières ⁴	29	-	23	2897	87	79
Boues mixtes de papetières ⁵	60	-	8	371	471	557
Boues mixtes de papetières ⁶	40	2200	46	1800	68	154
Boues mixtes de papetières ⁶	41	5700	53	1100	44	140
Boues de désencrage ⁵	53	-	103	252	133	108
Boues mixtes de papetières ⁷	40	-	114	1228	186	79
Fumier de bovins laitiers ⁸	20	-	55	1855	238	209
Fumier de bovins de boucherie ⁸	24	-	50	1891	226	129
Fumier de bovins ²	-	-	36	-	-	156
Fumier de moutons ⁸	30	-	27	4371	353	148
Fumier de volailles ⁸	52	-	125	1681	528	468
Fumier de volailles ²	-	-	192	-	-	399
Lisier de porcs ⁸	3,5	-	400	2000	1429	1571
Lisier de porcs en croissance ²	-	-	839	-	-	1475
Lisier de porcs – croissance ⁹	3,5	607	751	1908	491	1301
Lisier de porcs – maternité ⁹	2,6	766	307	2261	498	1916
Lisier de porcs – pouponnière ⁹	2,3	1293	1595	3707	690	12 759
Compost de résidus ménagers ¹⁰	62	-	256	11962	243	634
Compost de résidus ménagers ¹⁰	65	-	108	5343	334	325
Compost de résidus ménagers ¹⁰	62	-	201	6880	469	575
Critère C1	-	-	400	-	-	700
Critères C2 ^{11, 12}	-	-	1000	-	-	1850

¹ Masse sèche sur base humide.

² Adapté de Perron et Hébert (2007b).

³ Adapté de N'Dayegamiye et coll. (2001). Valeurs moyennes des teneurs rapportées pour les boues de papetières (n = 3).

⁴ Adapté de N'Dayegamiye et coll. (2003b). Valeurs moyennes des teneurs rapportées pour les boues de papetières (n = 3).

⁵ Adapté de Simard et coll. (1998)

⁶ Adapté de Arfaoui et coll. (2001).

⁷ Adapté de N'Dayegamiye (2006). Valeurs moyennes des teneurs rapportées pour les boues de papetières (n = 2).

⁸ Adapté de Tran et coll. (1996).

⁹ Adapté de Seydoux et coll. (2005). Pour les porcs en croissance, la valeur représente la moyenne des valeurs C-2.

¹⁰ N'Dayegamiye et coll. (2005).

¹¹ Tiré de Hébert (2008). La teneur limite du C2 pour le Cu est portée à 1500 mg Cu kg⁻¹ pour les résidus contenant plus de 2,5 % de P₂O₅.

Paramètres non retenus pour l'établissement de teneurs limites pour l'aluminium (Al), le fer (Fe) et le manganèse (Mn).

¹² Tiré de Hébert (2008). La limite de charge des résidus C2 est de 22 t (b.s.) ha⁻¹ an⁻¹.

Peu de données sont disponibles sur les teneurs en Al. Ainsi, mis à part les données concernant les lisiers de porcs, en accord avec nos propres analyses, les seules données fournies (Arfaoui et coll. 2001) suggèrent que les boues mixtes de papetières contiennent beaucoup plus d'Al que la FSLP_c, probablement en lien avec leur mode de fabrication. Au niveau du Fe, ce sont surtout les teneurs des composts de résidus ménagers qui dépassent la teneur moyenne pour les deux années de 3 747 mg kg⁻¹ (b.s.) de la FSLP_c. Par contre, la concentration moyenne en Mn de la FSLP_c, de 1 171 mg kg⁻¹ (b.s.), surpasse largement tous les contenus en Mn des autres AEOs, exception faite du lisier de porcs étudié par Tran et coll. (1996).

Pour les mêmes raisons que celles expliquant le peu de données rapportées, permettant d'effectuer une comparaison valable sur la base des caractéristiques en éléments fertilisants des FSLPs produites par centrifugation, il a été ardu de colliger un minimum de données sur les contenus en ÉTMs de diverses FSLPs. Les données trouvées, présentées au tableau 14, supportent cependant les résultats obtenus pour la FSLP_c dans cette étude. Certaines disparités sont observées, mais sont probablement dues aux différences dans les rations alimentaires données aux porcs et aux modes d'entreposage précédant le traitement. Ainsi, en regard des FSLPs centrifugées, les valeurs rapportées sont du même ordre de grandeur que celles obtenues pour la FSLP_c, exception faite du Mn qui est deux fois plus élevé dans la FSLP_c.

Tableau 14. Composition (b.s.) en ÉTMs de diverses FS de lisier de porcs.

Fraction solide de lisier de porcs	MS ¹	Al	Cu	Fe	Mn	Zn
	---- % ----	----- mg kg ⁻¹ -----				
FSLP tamis non compostée ²	-	-	147	1595	202	307
FSLP tamis compostée ²	-	-	226	1484	346	413
FSLP vis sans fin non compostée ³	-	2074	261	1779	572	1453
FSLP centrifugée non compostée ³	-	1977	356	1856	556	1030
FSLP centrifugée non compostée ⁴	25	-	516	4770	520	1177
FSLP centrifugée non compostée ⁵	26	-	635	4769	558	1131
Critère C1		-	400	-	-	700
Critères C2 ^{6,7}		-	1000	-	-	1850

¹ Masse sèche sur base humide.

² Adapté de Moral et coll. (2006b). La FSLP compostée 4 mois a été mélangée avec 20 % paille + 2 % résidus verts + 0,8 L lisier de porcs.

³ Adapté de Akpakouma (2009). FSLP obtenue à l'état pâteux et séchée passivement trois mois dans des serres ventilées.

⁴ Adapté de Cabral et coll. (1998) et Vasconcelos et coll. (1997).

⁵ Adapté de Vasconcelos et Cabral (1996).

⁶ Tiré de Hébert (2008). La teneur limite du C2 pour le Cu est portée à 1500 mg Cu kg⁻¹ pour les résidus contenant plus de 2,5 % de P₂O₅. Paramètres non retenus pour l'établissement de teneurs limites pour l'aluminium (Al), le fer (Fe) et le manganèse (Mn).

⁷ Tiré de Hébert (2008). La limite de charge des résidus C2 est de 22 t (b.s.) ha⁻¹ an⁻¹.

3.1.3 Agents pathogènes

Les *Escherichia coli* (*E. coli*) sont un constituant normal de la flore intestinale des humains et des animaux. Leur dénombrement est ainsi fréquemment utilisé comme indicateur de la présence réelle ou probable d'agents pathogènes d'origine fécale dans l'environnement. Dans cet ordre d'idée, le MDDEP utilise le dénombrement des *E. coli* comme indicateur afin d'encadrer la valorisation des MRFs. En 2008, l'analyse des coliformes fécaux a en effet été remplacée par celle des *E. coli*, moins sujette à des « faux positifs » (Hébert 2008). Tel que mentionné précédemment, la FSLP_c n'est pas une MRF et n'a donc pas à se conformer aux normes du MDDEP. Toutefois, l'apport d'agents pathogènes dans l'environnement peut avoir un

impact négatif sur la santé humaine et doit être considéré avec attention, quelle que soit la nature des AEOs apportés. Plus un AEOs est contaminé, plus le risque de contamination microbienne de l'eau et des récoltes est grand. De même, un contenu peu élevé en agents pathogènes permettra une utilisation plus sécuritaire du produit et diminuera la méfiance quant à son impact sur la santé humaine après épandage. Cela haussera aussi son acceptabilité auprès d'éventuels receveurs ou industries qui seraient intéressés à l'incorporer dans un procédé de fabrication d'engrais organique ou organo-minéral.

Les procédés de traitement, destinés initialement à faciliter la gestion des contenus en éléments fertilisants des lisiers, ont aussi un impact important sur leur populations d'agents pathogènes. Dans le cas de la séparation de phases (phases solide et liquide), les microorganismes se retrouvent concentrés dans la phase liquide (Watabe et coll. 2003), sans toutefois être totalement éliminés dans la phase solide. Ceci facilite l'assainissement de la FS par la suite. Dans la présente étude, la FSLP_c a été conditionnée selon la méthode décrite par Martin et coll. (2006), soit par ventilation forcée (10 jours) et maturation (80 jours). À la suite de ce conditionnement, le contenu en *E. coli* de la FSLP_c, déjà abaissé par la séparation du lisier, atteint moins de 1 000 NPP g⁻¹ (b.s.) (BNQ 2005). Cependant, même en absence de conditionnement, certains chercheurs ont estimé que le temps requis pour réduire la charge bactérienne de 90 % dans une FSLP, maintenue à température ambiante, était de l'ordre de 30 jours (Placha et coll. 1997). Au moment de sa reprise pour son application au champ (fin avril), soit environ 4 mois après la fin de la phase de maturation (fin décembre), les teneurs médianes en *E. coli* étaient de 723 et 106 200 NPP g⁻¹ (b.s.), en 2007 et 2008, respectivement. En 2007, la teneur en *E. coli* de la FSLP_c est donc restée assez stable. En 2008, la hausse observée pourrait découler d'un phénomène de recroissance microbienne. En effet, la FSLP_c de 2008 a été reprise environ deux semaines plus tard que celle de 2007. Puisque les températures remontent rapidement au printemps, il se peut que des conditions plus propices au développement des populations microbiennes aient pu se créer. Hébert (2005) explique ainsi les valeurs de *E. coli* mesurées, plus fortes qu'attendues, dans certains biosolides papetiers qui présentent habituellement des valeurs très faibles en *E. coli*. C'est d'ailleurs parce que ce phénomène est courant que le MDDEP ne présente plus de catégorie P1 basée sur les contenus en *E. coli*. Cependant, la validité de *E. coli* comme indicateur de la présence d'agents pathogènes pour les catégories P2 et P3 n'est pas remise en cause. Quoi qu'il en soit, la différence en *E. coli* mesurée entre les FSLP_c de 2007 et 2008, de prime abord importante, est mineure (5 %), considérant que la norme fixée par le MDDEP (2010b) pour la valorisation des MRFs de catégorie P2 est de 2 000 000 NPP g⁻¹ (b.s.).

Dans l'ensemble, à chacune des années, les contenus en *E. coli* étaient grandement sous le critère maximal pour la catégorie P2 (MDDEP 2010b). De plus, ces valeurs sont en deçà de la moyenne pour le lisier de porcs épandu au champ. Hébert et coll. (2003) rapportent des valeurs médianes de *E. coli* de 15 000 000 NPP g⁻¹ (b.s.) suite à l'analyse de 6 lisiers de porcs (min. = 5 x 10⁵, max. = 5 x 10⁷), et de 64 000 NPP g⁻¹ (b.s.) suite à l'analyse de 5 fumiers de bovins (min. = 235, max. = 285 000). Comparativement à l'épandage des fumiers et lisiers, il semble donc que l'application de FSLP_c sur les terres engendre un faible risque de contamination. De même, dans une étude visant à documenter l'aspect qualitatif des MRFs valorisées en agriculture au Québec, Charbonneau et coll. (2001) rapportent que bien qu'une majorité de biosolides de papetières comprenait en moyenne moins de 1 000 NPP g⁻¹ (b.s.), le maximum atteignait 99 000 NPP g⁻¹ (b.s.). De plus, la majorité des biosolides municipaux était de catégorie P2, tout comme le serait la FSLP_c.

3.2 Évaluer l'impact de l'ajout de FSLP_c au sol en relation avec la nutrition et le développement des parties aériennes des plants en cours de saison, et le rendement en tubercules à la récolte

3.2.1 Développement et nutrition azotée des plants en cours de saison

Le site utilisé a permis d'obtenir une réponse hautement significative de la culture à la fertilisation azotée, tant de l'engrais N minéral (N_{\min}), que de la FSLP_c (tableaux 15 et 16). Ainsi, l'utilisation de la FSLP_c comme engrais azoté a assuré un bon développement des plants dès le début de la saison. Au cours des deux étés, dès le stade bouton, l'ensemble des doses de FSLP_c a permis d'atteindre une croissance et une nutrition en N des plants au moins équivalente à celles des plants témoins N_{\min} , malgré le fait que la plus faible dose ne corresponde *a priori* qu'à 70 % de la dose de N_{\min} . Au stade floraison, les plants fertilisés avec la FSLP_c avaient poursuivi leur bon développement et présentaient même, dans l'ensemble, des masses sèches supérieures à celles des plants témoins N_{\min} . Ainsi, en 2007, toutes les doses de FSLP_c ont permis aux plants de produire plus de biomasse que le N_{\min} , avec des différences significatives allant de 29 à 38 %. En 2008, les doses correspondant *a priori* à 100 et 130 % de la dose de N_{\min} ont également permis de produire de 24 à 30 % plus de biomasse. Cependant, à la plus faible dose, bien qu'il y ait eu un gain de croissance apparent avec la FSLP_c, celui-ci n'est pas ressorti comme étant significatif. Un tel gain sur la croissance est aussi rapporté par Moral et coll. (2003, 2005) suite à l'utilisation au champ de FSLPs brutes ou compostées dans la culture du concombre et du chou. Comparativement à l'engrais minéral azoté, l'emploi des deux types de FSLP a résulté en une production accrue de biomasse par les plants, même si selon les auteurs un tel gain de biomasse ne se produit habituellement pas avec des engrais organiques.

Par ailleurs, le suivi des prélèvements en N_{tot} des plants démontre que le N de la FSLP_c a été prélevé efficacement par la culture, au moins autant que le N_{\min} (tableaux 15 et 16). Ainsi, dès le stade bouton, tant en 2007 qu'en 2008, les plants fertilisés avec la FSLP_c ont prélevé à toutes les doses au moins autant de N_{tot} que les plants témoins fertilisés au N_{\min} . Ceci est particulier, considérant que le N de la FSLP_c est majoritairement sous forme organique et, qu'à ce stade, seulement cinq semaines se sont écoulées depuis l'apport de la FSLP_c au champ. Ceci suggère que le N_o de la FSLP_c se minéralise rapidement, indiquant sa valeur comme engrais azoté, même tôt en saison. Au stade floraison, l'excellente utilisation du N de la FSLP_c s'est poursuivie. Selon les années, les plants fertilisés avec la FSLP_c présentent même des prélèvements en N_{tot} supérieurs à ceux des plants témoins N_{\min} . Par exemple, en 2008, l'application des doses correspondant *a priori* à 100 et 130 % de la dose de N_{\min} a résulté en des prélèvements en N de 33 % supérieurs significativement à ceux des plants témoins N_{\min} . Dans une expérience menée en pots à l'extérieur, Vasconcelos et coll. (1997) mentionnent aussi que l'usage de FSLPs centrifugées (à une dose équivalente à 5 t ha⁻¹ de FSLP_c) a permis d'atteindre des prélèvements supérieurs en N par les plants de blé, comparativement aux plants fertilisés au N_{\min} . Les auteurs associaient ces prélèvements à une meilleure nutrition en N puisque la concentration en N des plants de blé fertilisés avec la FSLP était plus grande que celle des plants fertilisés au N_{\min} . Dans la présente étude, les analyses foliaires effectuées à la floraison vont également en ce sens et viennent corroborer la bonne utilisation du N de la FSLP_c (tableaux 15 et 16). En effet, durant les deux années d'étude, l'application de FSLP_c, même à la dose la plus faible (70 % *a priori* du N_{\min}), a permis aux plants de maintenir une concentration en N_{tot} au-dessus de la norme de suffisance de 35 000 mg kg⁻¹ (Rowe 1993). De plus, les plants fertilisés avec la dose maximale de

FSLP_c présentent des concentrations foliaires significativement supérieures de 6 et 9 % à celles des plants témoins N_{min}, pour 2007 et 2008, respectivement. L'emploi de FSLP_c a donc assuré une excellente nutrition en N des plants qui a permis de maintenir une teneur optimale en cet élément, assurant aux plants un métabolisme normal ainsi qu'une bonne croissance.

Tableau 15. Impact de l'ajout de FSLP_c comme engrais azoté sur le développement et la nutrition en N des plants (b.s.) en cours de saison, étés 2007 et 2008.

Traitements [†]	Matière sèche (g plant ⁻¹)		Prélèvements (kg N ha ⁻¹)		N _{feuille} (mg kg ⁻¹)
	bouton	floraison	bouton	floraison	floraison
2007					
0 FS + PK	21,3	21,1	26,5	19,3	34 625
6 FS + PK	34,3	61,6	56,4	61,0	44 075
9 FS + PK	48,9	62,9	71,3	70,5	47 025
12 FS + PK	44,3	66,2	65,3	79,9	48 000
Témoin (NPK)	33,7	47,8	52,9	59,2	45 175
Combo (2,75 FS + NK)	32,3	54,3	46,4	51,4	43 225
2008					
0 FS + PK	15,3	24,1	11,2	22,4	30 400
5 FS + PK	23,3	62,3	24,5	76,3	34 975
7,5 FS + PK	30,6	69,0	39,8	86,2	38 950
10 FS + PK	25,5	65,7	33,8	85,8	43 000
Témoin (NPK)	28,7	53,1	31,0	64,7	39 275
Combo (2,0 FS + NK)	24,6	61,1	29,1	76,9	42 800

[†] Les valeurs présentées sont les moyennes ajustées au modèle statistique.

Tableau 16. Analyses statistiques de l'impact de l'ajout de FSLP_c comme engrais azoté sur le développement et la nutrition en N des plants (b.s.) en cours de saison, étés 2007 et 2008.

Sources de variation	2007					2008				
	Matière sèche		Prélèvements		N _{feuille}	Matière sèche		Prélèvements		N _{feuille}
	bouton	floraison	bouton	floraison	floraison	bouton	floraison	bouton	floraison	floraison
Traitements [†]	**	***	***	***	***	*	***	***	***	***
Linéaire	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***
Quadratique	ns	**	(0,0746)	ns	**	ns	***	ns	***	ns
FSLP _c vs NPK	(0,1007)	**	ns	ns	ns	ns	*	ns	*	ns
FSLP _c vs 0PK	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***
0 FS vs NPK [‡]	*	***	**	***	***	**	***	***	***	***
70 % FS vs NPK	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**
100 % FS vs NPK	*	*	*	ns	ns	ns	*	ns	*	ns
130 % FS vs NPK	(0,1018)	*	ns	*	*	ns	*	ns	*	*
Combo vs NPK	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*

[†] Niveau de signification de l'analyse de variance : *, **, ***, ns indiquent significatif à $P \leq 0,05, 0,01, 0,001$, et non significatif, respectivement.

[‡] Comparaison des moyennes par la différence des moindres carrés. La dose de FS est exprimée en pourcentage d'équivalent minéral tel qu'estimé *a priori*.

Grâce aux mesures de prélèvement en N_{tot} des plants, il est aussi possible de calculer une efficacité préliminaire du N de la FSLP_c (tableau 17). À ce stade, les coefficients d'efficacité (CE) obtenus sont préliminaires étant donné qu'il reste encore plusieurs semaines aux plants pour prélever davantage de N des engrais minéraux et de la FSLP_c. Ces CE demeurent toutefois valides pour fins de comparaison des produits entre eux, pour la période considérée. Ainsi, au stade bouton, le CE du N de la FSLP_c atteint 93 % en 2007, et 77 % en 2008. En 2007, l'efficacité du N de la FSLP_c a donc été pratiquement équivalente à celle du N_{min} . En 2008, son efficacité était aussi très intéressante, d'autant plus que dans les faits, le développement et la nutrition en N des plants fertilisés avec la FSLP_c ont été au moins équivalents et parfois supérieurs à ceux des plants témoins N_{min} . Cette situation s'est poursuivie au stade floraison avec des CE maximaux du N de la FSLP_c de 86 et 101 %, en 2007 et 2008, respectivement. Le N de la FSLP_c semble donc rapidement disponible, bien qu'il origine principalement de la minéralisation du N_0 . D'autres essais testant la valorisation d'AEOs ayant des C/N bas rapportent aussi que la minéralisation du N_0 peut être très rapide, démarrant en moins d'une semaine (Giroux et coll. 2007). L'étude de Cordovil et coll. (2000), qui ont comparé en incubation contrôlée l'efficacité du N de divers AEOs, tend même à montrer que la FSLP aurait une des capacités de fourniture en N parmi les plus efficaces. En effet, en comparant des boues municipales et de papetières, du fumier de poulets, de la FSLP centrifugée, du fumier composté de porcs et de la farine de cornes, ils ont observé que le contenu en nitrates du sol suite à l'apport de FSLP augmentait très rapidement, faisant de la FSLP une source immédiate de N pour la culture. De même, à la fin des 63 jours d'incubation, 35 % du N_{tot} de la FSLP était minéralisé, contre seulement 21 et 26 % pour les boues municipales et de papetières. La FSLP se retrouvait ainsi dans le groupe le plus efficace avec le fumier de porcs composté et le fumier de poulets.

Tableau 17. Coefficients d'utilisation apparente et efficacité fertilisante du N de la FSLP_c aux stades boutons et floraison, étés 2007 et 2008.

Traitements [†]	----- Prélèvements (kg N ha ⁻¹) -----		CUA [‡]		CE [§]	
	bouton	floraison	bouton	floraison	bouton	floraison
2007						
0 FS + PK	26,5	19,3				
6 FS + PK	56,4	61,0	0,16	0,23	0,93	0,86
9 FS + PK	71,3	70,5	0,16	0,19	0,93	0,70
12 FS + PK	65,3	79,9	0,11	0,17	0,60	0,62
Témoin (NPK)	52,9	59,2	0,18	0,27		
Combo (2,75 FS + NK)	46,4	51,4				
2008						
0 FS + PK	11,2	22,4				
5 FS + PK	24,5	76,3	0,07	0,29	0,53	1,01
7,5 FS + PK	39,8	86,2	0,10	0,23	0,77	0,80
10 FS + PK	33,8	85,8	0,06	0,17	0,45	0,60
Témoin (NPK)	31,0	64,7	0,13	0,28		
Combo (2,0 FS + NK)	29,1	76,9				

[†] Les valeurs présentées pour les prélèvements en N_{tot} sont celles du tableau 16.

[‡] CUA : coefficient d'utilisation apparente du N.

[§] CE : coefficient d'efficacité fertilisante du N de la FSLP_c.

3.2.2. Développement et nutrition phosphatée des plants en cours de saison

Le site utilisé a également permis d'obtenir une réponse significative de la culture à la fertilisation phosphatée. Toutefois, la réponse obtenue suite à l'apport de P de la FSLP_c a été plus grande que celle générée par le P de l'engrais minéral (P_{min}) (tableaux 18 et 19). Par exemple, en 2007 au stade bouton, les plants ayant reçu du P_{min} ne présentent pas un prélèvement en P significativement plus grand que les plants non fertilisés. À l'opposé, les plants fertilisés avec la FSLP_c présentent un prélèvement en P plus grand que les plants non fertilisés. Une telle hausse du prélèvement en P suite à l'application de doses de FSLP a aussi été rapportée lors d'études menées en pots avec des cultures de blé et de maïs-grain (Vasconcelos et coll. 1997, Vasconcelos et coll. 1999). De plus, au stade floraison, pour les deux années, les plants ayant reçu du P_{min} avaient une teneur en P de la 4^e feuille mature qui ne dépassait pas celle des plants non fertilisés. Par contre, celle des plants fertilisés avec la FSLP_c était de 23 à 51 % supérieure à celle des plants non fertilisés.

Il existe également des différences significatives entre les plants fertilisés avec la FSLP_c et ceux ayant reçu du P_{min}. Par exemple, au stade floraison, à chaque année, les teneurs en P de la 4^e feuille mature des plants ayant reçu les doses de FSLP_c correspondant *a priori* à 90 et 120 % de la dose P_{min} sont en moyenne de 29 et 43 % supérieures à celles des plants ayant reçu du P_{min}. De plus, au cours des deux années, les teneurs en P des feuilles des plants fertilisés au P_{min} sont sous la norme de suffisance de 2 500 mg kg⁻¹, et se situent dans l'intervalle dit marginal, allant de 1 500-2 500 mg kg⁻¹ (Rowe 1993). Les plants fertilisés au P_{min} présentent donc un statut nutritionnel similaire à celui des plants non fertilisés, contrairement aux plants fertilisés avec la FSLP_c. Ainsi, les mesures nutritionnelles rapportées démontrent, quel que soit le stade, que le P de la FSLP_c a été prélevé efficacement par la culture, au moins autant que le P_{min} et parfois davantage. Ceci concorde avec les résultats de la caractérisation biochimique qui indique que la quasi-totalité du P de la FSLP_c est sous une forme inorganique, considérée habituellement comme disponible à la plante. Cette étude démontre de plus que cette disponibilité s'instaure très rapidement. Une telle hausse de la nutrition est aussi rapportée par Vasconcelos et Cabral (1996). Dans une expérience en serres, ils ont mesuré une nutrition en P 2,6 fois plus grande lorsque les plants de maïs étaient fertilisés avec de la FSLP centrifugée (équivalent à une dose de 10 t ha⁻¹ de FSLP_c) plutôt qu'avec du P_{min}.

Cette disponibilité est confirmée par les mesures de prélèvement en P_{tot} des plants, permettant de calculer le CE du P de la FSLP_c pour la première partie de la saison. Le tableau 20 présente les CE préliminaires obtenus. On constate tout d'abord que la différence d'efficacité entre le P de la FSLP_c et le P_{min} est beaucoup plus marquée que pour l'élément N. De plus, quelle que soit la dose ou le stade étudiés, les plants ont fait une utilisation beaucoup plus grande du P de la FSLP_c que du P_{min}. Ainsi, dès le stade bouton, les CE du P de la FSLP_c atteignent entre 245 et 130 %, en 2007 et 2008, respectivement. Au stade floraison, ils demeurent très élevés, avec des maxima de 209 et 260 %, en 2007 et 2008, respectivement. La forme du P en elle-même ou l'ajout simultané de composés également inclus dans la FSLP_c, semble donc aider le P de la FSLP_c à demeurer disponible dans le sol. Le P est en effet reconnu pour être un élément rapidement fixé par le sol et donc le CUA est habituellement bas, tel que le démontre la faible utilisation du P de l'engrais minéral atteignant au mieux 3 % aux stades étudiés.

Tableau 18. Impact de l'ajout de FSLP_c comme engrais phosphaté sur le développement et la nutrition en P des plants (b.s.) en cours de saison, étés 2007 et 2008.

Traitements [†]	Matière sèche (g plant ⁻¹)		Prélèvements (kg P ha ⁻¹)		P _{feuille} (mg kg ⁻¹)
	bouton	floraison	bouton	floraison	floraison
2007					
0 FS + NK	26,2	23,8	2,7	1,4	2 242
1,5 FS + NK	37,7	49,1	5,0	4,2	2 768
2,5 FS + NK	41,3	56,8	5,5	4,6	3 063
3,5 FS + NK	35,7	62,3	5,6	6,5	3 376
Témoin (NPK)	33,7	47,8	4,1	3,4	2 330
Combo (2,75 FS + NK)	32,3	54,4	4,7	5,2	3 045
2008					
0 FS + NK	21,8	39,5	1,6	2,4	1 789
1,25 FS + NK	26,6	52,9	2,7	3,8	2 253
1,75 FS + NK	25,2	62,6	2,6	5,2	2 475
2,5 FS + NK	26,5	59,0	3,8	5,7	2 787
Témoin (NPK)	28,7	53,1	2,7	3,4	1 958
Combo (2,0 FS + NK)	24,6	61,1	2,7	5,0	2 338

[†] Les valeurs présentées sont les moyennes ajustées au modèle statistique.

Tableau 19. Analyses statistiques de l'impact de l'ajout de FSLP_c comme engrais phosphaté sur le développement et la nutrition en P des plants (b.s.) en cours de saison, étés 2007 et 2008.

Sources de variation	2007					2008				
	Matière sèche		Prélèvements		P _{feuille}	Matière sèche		Prélèvements		P _{feuille}
	bouton	floraison	bouton	floraison	floraison	bouton	floraison	bouton	floraison	floraison
Traitement [†]	ns	**	*	***	***	ns	**	*	***	***
Linéaire	-	***	**	***	***	-	***	***	***	***
Quadratique	-	ns	ns	ns	ns	-	ns	ns	ns	ns
FSLP _c vs NPK	-	ns	ns	*	***	-	ns	ns	ns	***
FSLP _c vs NOK	-	***	**	***	***	-	***	**	***	***
0 FS vs NPK [‡]	-	**	ns	*	ns	-	*	*	*	ns
60 % FS vs NPK	-	ns	ns	ns	*	-	ns	ns	ns	(0,1010)
90 % FS vs NPK	-	ns	ns	ns	***	-	ns	ns	***	**
120 % FS vs NPK	-	(0,0878)	(0,1174)	**	***	-	ns	(0,0603)	***	***
Combo vs NPK	-	ns	ns	(0,0677)	***	-	ns	ns	**	*

[†] Niveau de signification de l'analyse de variance : *, **, ***, ns indiquent significatif à $P \leq 0,05, 0,01, 0,001$, et non significatif, respectivement.

[‡] Comparaison des moyennes par la différence des moindres carrés. La dose de FS est exprimée en pourcentage d'équivalent minéral tel qu'estimé *a priori*.

Tableau 20. Coefficients d'utilisation apparente et efficacité fertilisante du P de la FSLP_c aux stades boutons et floraison, étés 2007 et 2008.

Traitements [†]	----- Prélèvements (kg P ha ⁻¹) -----		CUA [‡]		CE [§]	
	bouton	floraison	bouton	floraison	bouton	floraison
2007						
0 FS + NK	2,7	1,4				
1,5 FS + NK	5,0	4,2	0,052	0,064	2,45	2,09
2,5 FS + NK	5,5	4,6	0,038	0,044	1,79	1,43
3,5 FS + NK	5,6	6,5	0,028	0,050	1,32	1,63
Témoin (NPK)	4,1	3,4	0,021	0,031		
Combo (2,75 FS + NK)	4,7	5,2				
2008						
0 FS + NK	1,6	2,4				
1,25 FS + NK	2,7	3,8	0,022	0,022	1,30	1,82
1,75 FS + NK	2,6	5,2	0,014	0,040	0,84	2,60
2,5 FS + NK	3,8	5,7	0,022	0,033	1,30	2,15
Témoin (NPK)	2,7	3,4	0,017	0,015		
Combo (2,0 FS + NK)	2,7	5,0				

[†] Les valeurs présentées pour les prélèvements en P_{tot} sont celles du tableau 18.

[‡] CUA : coefficient d'utilisation apparente du P.

[§] CE : coefficient d'efficacité fertilisante du P de la FSLP_c.

Dans le cadre des essais sur le P, les teneurs en K, Ca et Mg de la 4^e feuille mature étaient également disponibles. Les résultats démontrent que, tel qu'anticipé, suivant l'impact de la centrifugation sur ces éléments, le ratio K/(Ca+Mg) a été significativement modifié dans la plante (tableaux 21 et 22). Ce changement d'équilibre semble principalement dû à une absorption beaucoup plus grande du Mg en présence de toutes les doses d'applications de FSLP_c testées, tandis que l'absorption du Ca ne présente aucune différence significative. Toutefois, même à la plus faible dose testée, les teneurs en Mg mesurées dans les plants fertilisés avec la FSLP_c étaient de 28 et 33 % supérieures à celles des plants ayant reçu du P_{min} en 2007 et 2008, respectivement. Cette différence a atteint 38 et 56 % avec la plus forte dose, en 2007 et 2008, respectivement. Cependant, l'impact sur le ratio dans son ensemble est moins grand que prévu puisqu'aucune des années, une seule dose de FSLP_c a entraîné une diminution significative du ratio cationique, soit la dose intermédiaire en 2007 et maximale en 2008. De plus, aucune déficience en K n'a été provoquée. Cependant, il faut considérer que ces changements se sont produits suite à une seule année d'application. Cela démontre que les éléments de la FSLP_c possèdent une grande disponibilité, ce qui est un point positif. En effet, les éléments mineurs sont essentiels pour assurer un bon développement des plants et la FSLP_c en contient des quantités efficaces comparativement aux engrais minéraux N qui en sont dépourvus. Par contre, une attention particulière devra être apportée si la FSLP_c est valorisée sur des superficies en fourrages, puisque pour la santé des animaux, le maintien d'un certain ratio K/(Ca+Mg) est très important. Cependant, dans la culture qui nous occupe, le changement de ratio n'a en aucun cas nui au bon développement de la culture ou entraîné de moins bons rendements (section 3.2.3).

Tableau 21. Impact de l'ajout de FSLP_c comme engrais phosphaté sur la nutrition en K, Ca et Mg des plants (4^e feuille, b.s.) au stade 50-75 % de floraison, étés 2007 et 2008.

Traitements [†]	K Ca Mg			K (Ca + Mg)
	(mg kg ⁻¹)			
2007				
0 FS + NK	53 235	6 698	2 834	5,60
1,5 FS + NK	45 285	6 587	3 989	4,39
2,5 FS + NK	44 172	6 829	4 361	4,02
3,5 FS + NK	42 399	5 889	4 304	4,22
Témoin (NPK)	47 362	6 684	3 116	4,83
Combo (2,75 FS + NK)	43 910	5 592	3 830	4,69
2008				
0 FS + NK	50 897	6 715	2058	5,85
1,25 FS + NK	39 338	4 761	2918	5,17
1,75 FS + NK	39 494	5 589	3241	4,57
2,5 FS + NK	35 585	5 553	3434	4,00
Témoin (NPK)	44 519	6 299	2200	5,26
Combo (2,0 FS + NK)	38 097	7 186	3161	3,77

[†] Les valeurs présentées sont les moyennes ajustées au modèle statistique.

Tableau 22. Analyses statistiques de l'impact de l'ajout de FSLP_c comme engrais phosphaté sur le développement et la nutrition en N des plants (b.s.) en cours de saison, étés 2007 et 2008.

Sources de variation	2007				2008			
	K	Ca	Mg	K (Ca + Mg)	K	Ca	Mg	K (Ca + Mg)
Traitement [†]	**	**	***	**	**	*	***	***
Linéaire	***	ns	***	***	***	ns	***	***
Quadratique	ns	ns	**	*	ns	ns	ns	ns
FSLP _c vs NPK	ns	ns	***	*	*	ns	***	*
FSLP _c vs N0K	***	ns	***	***	***	*	***	***
0 FS vs NPK [‡]	*	ns	ns	*	(0,0686)	ns	ns	ns
60 % FS vs NPK	ns	ns	**	ns	ns	ns	**	ns
90 % FS vs NPK	ns	ns	***	*	ns	ns	***	ns
120 % FS vs NPK	ns	ns	***	ns	**	ns	***	**
Combo vs NPK	ns	**	**	ns	ns	ns	**	**

[†] Niveau de signification de l'analyse de variance : *, **, ***, ns indiquent significatif à $P \leq 0,05$, 0,01, 0,001, et non significatif, respectivement.

[‡] Comparaison des moyennes par la différence des moindres carrés. La dose de FS est exprimée en pourcentage d'équivalent minéral tel qu'estimé *a priori*.

3.2.3 Rendements et qualité des tubercules

La culture a très bien répondu à la fertilisation N, tant de l'engrais minéral que de la FSLP_c (tableaux 23 et 24). Les rendements obtenus sont de l'ordre des rendements moyens de 31,9 et 29,4 t ha⁻¹, enregistrés au Québec pour 2007 et 2008, respectivement (Statistiques Canada 2010). Ceci vient renforcer la validité du CE final (section 3.5.1) calculé pour le N à la récolte puisque les rendements produits avec l'emploi de la FSLP_c comme engrais sont équivalents à ceux produits à l'échelle de la province avec les engrais minéraux. Les doses croissantes d'engrais FSLP_c ont soutenu une hausse des rendements totaux et vendables, les deux années. Dès la plus faible dose de FSLP_c (70 % de la dose de N_{min} *a priori*), des rendements totaux et vendables égaux à ceux obtenus avec le N_{min} ont été produits. En 2007, le rendement total obtenu avec la dose la plus élevée de FSLP_c tendait ($P = 0,13$) à être de 4 t ha⁻¹ plus élevé que celui obtenu avec l'engrais minéral. Cette tendance est appuyée par les résultats de 2008, révélant que les 2^e et 3^e doses (100 et 130 % de la dose de N_{min} *a priori*) ont permis l'atteinte de rendements totaux significativement plus élevés qu'avec l'utilisation du N_{min}. Avec la dose intermédiaire de FSLP_c, *a priori* équivalente au N_{min}, 6,3 t ha⁻¹ de plus ont été récoltées. Avec la plus forte dose, c'est 11,3 t ha⁻¹ de plus qui ont été produites. À cette dose, la différence significative de rendement s'est aussi étendue aux rendements vendables, faisant en sorte que 8,6 t ha⁻¹ de plus ont été récoltées avec la FSLP_c comparativement au N_{min}. De plus, la même qualité de tubercules (densité relative et incidence de la gale) a été atteinte, comme dans le cas de toutes les doses puisque l'utilisation de la FSLP_c n'a entraîné aucune baisse de densité relative ou incidence accrue de gale. Ce résultat est important car la pomme de terre est parfois considérée comme étant sensible aux apports de MO fraîche et riche en N en relation avec l'incidence de la gale commune. Ainsi, dans cette expérience, bien que la FSLP_c soit riche en N et C, son utilisation n'a pas eu d'impact sur la présence de gale. La différence de productivité mesurée est donc importante économiquement. Considérant une entreprise de taille moyenne ayant 104 ha en pommes de terre, vendues au prix moyen du marché de 266 \$ t⁻¹ (FPPTQ 2010c), cela fait une différence de revenus de 237 910 \$. Enfin, l'emploi du traitement Combo a produit des rendements égaux à ceux obtenus avec l'engrais minéral.

Le fait de pouvoir valoriser des doses élevées de FSLP_c sans mesurer de baisse de la densité relative est un indice supplémentaire que le N de la FSLP_c devient disponible au bon moment dans la saison de croissance. Dans la culture de la pomme de terre, le prélèvement en N par le feuillage est en effet à son maximum entre 65 et 75 jours après la plantation (Tran et Giroux 1991). À ce sujet, les données présentées précédemment sur le prélèvement en N à la floraison ont déjà montré la capacité de la FSLP_c à fournir en grande quantité le N à ce stade (tableau 15). Par la suite, le N migre vers les tubercules. Ainsi, si la pomme de terre exige beaucoup de N tôt en saison, elle est en revanche sensible aux excès de N plus tard. Il faut donc s'assurer lors de l'utilisation d'engrais organiques que ceux-ci ne causent pas de retard de maturation dû à une minéralisation trop lente du N_o entraînant un relâchement trop tardif de N minéral. La grande qualité et les bons rendements obtenus suite à l'application des doses croissantes de FSLP_c suggèrent ainsi que le N_o de la FSLP_c se minéralise rapidement, sans causer de retard de maturation physiologique. Ceci concorde avec le faible C/N de la FSLP_c qui laissait également présager d'une minéralisation active et rapide.

Tableau 23. Impact de l'ajout de FSLP_c comme engrais azoté au sol sur les rendements (b.h.) et la qualité des tubercules de pommes de terre, étés 2007 et 2008.

Traitements [†]	----- Rendement (t ha ⁻¹) -----		Densité relative	Indice de gale
	total	vendable		
2007				
0 FS + PK	20,6	16,8	1,082	0,000
6 FS + PK	39,3	33,1	1,085	0,042
9 FS + PK	42,0	35,9	1,080	0,084
12 FS + PK	43,9	36,8	1,077	0,000
Témoin (NPK)	39,9	34,9	1,083	0,000
Combo (2,75 FS + NK)	38,6	33,2	1,082	0,209
2008				
0 FS + PK	11,9	7,5	1,076	0,000
5 FS + PK	30,4	24,3	1,080	0,040
7,5 FS + PK	37,6	30,6	1,077	0,000
10 FS + PK	42,6	35,6	1,076	0,000
Témoin (NPK)	31,3	27,0	1,080	0,010
Combo (2,0 FS + NK)	33,3	28,7	1,079	0,000

[†] Les valeurs présentées sont les moyennes ajustées au modèle statistique.

Tableau 24. Analyses statistiques de l'impact de l'ajout de FSLP_c comme engrais azoté au sol sur les rendements (b.h.) et la qualité des tubercules de pommes de terre, étés 2007 et 2008.

Sources de variation	----- 2007 -----				----- 2008 -----			
	----- Rendement -----		Densité relative	Indice de gale	----- Rendement -----		Densité relative	Indice de gale
	total	vendable			total	vendable		
Traitements [†]	***	***	**	***	***	***	ns	ns
Linéaire	***	***	**	ns	***	***	-	-
Quadratique	**	**	**	ns	ns	ns	-	-
FSLP _c vs NPK	ns	ns	ns	ns	*	ns	-	-
FSLP _c vs OPK	***	***	ns	ns	***	***	-	-
0 FS vs NPK [‡]	***	***	ns	ns	***	***	-	-
70 % FS vs NPK	ns	ns	ns	ns	ns	ns	-	-
100 % FS vs NPK	ns	ns	ns	ns	*	ns	-	-
130 % FS vs NPK	(0,1311)	ns	***	ns	**	**	-	-
Combo vs NPK	ns	ns	ns	***	ns	ns	-	-

[†] Niveau de signification de l'analyse de variance : *, **, ***, ns indiquent significatif à $P \leq 0,05, 0,01, 0,001$, et non significatif, respectivement.

[‡] Comparaison des moyennes par la différence des moindres carrés. La dose de FS est exprimée en pourcentage d'équivalent minéral tel qu'estimé *a priori*.

La réponse de la culture aux engrais P, bien que moins marquée que pour l'engrais N, a tout de même été très significative (tableaux 25 et 26), tant pour la FSLP_c que pour l'engrais minéral. Une fois encore, les rendements obtenus sont de l'ordre des rendements moyens de 31,9 et 29,4 t ha⁻¹, enregistrés au Québec pour 2007 et 2008, respectivement (Statistiques Canada 2010). De même que pour le N, ceci vient donc renforcer la validité du CE calculé pour le P puisque les rendements atteints avec l'emploi de la FSLP_c sont équivalents à ceux produits avec les engrais minéraux à l'échelle de la province. Au cours des deux années, l'augmentation des doses de FSLP_c a été suivie d'une hausse des rendements totaux et vendables. De plus, à toutes les doses, des rendements totaux et vendables obtenus avec les trois doses de FSLP_c étaient au moins équivalents à ceux produits avec l'engrais P_{min}. Ainsi, même aux plus faibles doses (60 % de la dose de P_{min} *a priori*) qui n'étaient que de 1,5 et 1,25 t ha⁻¹ en 2007 et 2008 respectivement, des rendements similaires ont été récoltés (tableau 25). En fait, en 2008, la plus forte dose de FSLP_c a même permis de produire 8,7 et 8,1 t ha⁻¹ de plus en termes de rendements totaux et vendables, respectivement, qu'avec l'engrais P_{min}. Par ailleurs, quelle que soit la dose testée, l'utilisation de la FSLP_c n'a entraîné aucune baisse de densité relative ou incidence accrue de gale, produisant ainsi des tubercules de même qualité que ceux produits avec l'engrais minéral. Ainsi, considérant une entreprise de taille moyenne ayant 104 ha en pommes de terre vendues au prix moyen du marché de 266 \$ t⁻¹ (FPPTQ 2010c), l'utilisation de 3,5 t ha⁻¹ de FSLP_c a généré une différence de rendement vendable engendrant un revenu supplémentaire de 224 078 \$.

Tableau 25. Impact de l'ajout de FSLP_c comme engrais phosphaté au sol sur les rendements (b.h.) et la qualité des tubercules de pommes de terre, étés 2007 et 2008.

Traitements [†]	----- Rendement (t ha ⁻¹) -----		Densité relative	Indice de gale
	total	vendable		
2007				
0 FS + NK	31,7	27,2	1,081	0,033
1,5 FS + NK	37,5	33,0	1,083	0,042
2,5 FS + NK	40,5	33,7	1,080	0,050
3,5 FS + NK	41,5	34,9	1,079	0,100
Témoin (NPK)	39,9	34,8	1,083	0,000
Combo (2,75 FS + NK)	38,6	33,2	1,082	0,209
2008				
0 FS + NK	20,9	15,9	1,076	0,000
1,25 FS + NK	29,3	25,2	1,078	0,000
1,75 FS + NK	35,9	32,2	1,080	0,000
2,5 FS + NK	40,0	35,1	1,075	0,010
Témoin (NPK)	31,3	27,0	1,080	0,010
Combo (2,0 FS + NK)	33,3	28,7	1,079	0,000

[†] Les valeurs présentées sont les moyennes ajustées au modèle statistique.

Tableau 26. Analyses statistiques de l'impact de l'ajout de FSLP_c comme engrais phosphaté au sol sur les rendements (b.h.) et la qualité des tubercules de pommes de terre, étés 2007 et 2008.

Sources de variation	2007				2008			
	Rendement		Densité	Indice	Rendement		Densité	Indice
	total	vendable	relative	de gale	total	vendable	relative	de gale
Traitements [†]	*	*	ns	**	***	***	ns	ns
Linéaire	***	**	-	ns	***	***	-	-
Quadratique	ns	ns	-	ns	ns	ns	-	-
FSLP _c vs NPK	ns	ns	-	ns	ns	ns	-	-
FSLP _c vs NOK	**	**	-	ns	***	***	-	-
0 FS vs NPK [‡]	**	**	-	ns	**	**	-	-
60 % FS vs NPK	ns	ns	-	ns	ns	ns	-	-
90 % FS vs NPK	ns	ns	-	ns	ns	ns	-	-
120 % FS vs NPK	ns	ns	-	ns	**	*	-	-
Combo vs NPK	ns	ns	-	***	ns	ns	-	-

[†] Niveau de signification de l'analyse de variance : *, **, ***, ns indiquent significatif à $P \leq 0,05, 0,01, 0,001$, et non significatif, respectivement.

[‡] Comparaison des moyennes par la différence des moindres carrés. La dose de FS est exprimée en pourcentage d'équivalent minéral tel qu'estimé *a priori*.

Les rendements vendables plus élevés obtenus avec les doses les plus grandes de FSLP_c, tant dans le cas de l'essai N que de l'essai P, pourraient être attribués au fait que, *a priori*, des quantités plus grandes de N ou P ont été apportées et qu'une dose plus forte de N ou P minéral aurait eu le même effet. Cette hypothèse sera à vérifier avec les CE finaux qui seront calculés pour le N et P de la FSLP_c. Toutefois, il faut considérer que les doses de N ou P minéral employées sont celles recommandées par le CRAAQ (2003) et que peu de gains sont généralement obtenus par l'utilisation de quantités plus importantes. La grille phosphore, entre autres, vient tout juste d'être refaite et les résultats sur plus de 100 sites d'essai font bien ressortir que l'ajout de doses dépassant les 150 kg P₂O₅ ha⁻¹ ne conduit que dans de rares cas à des rendements plus élevés, la majorité des cas étant dus à un sol dégradé, ce qui n'est pas le cas du site d'essai de cette étude qui présente un sol d'excellente qualité.

3.2.4 Contenus en ÉTMs et nitrates

L'analyse chimique des tubercules révèle que l'utilisation de la FSLP_c n'a pas entraîné de hausse significative générale des contenus en ÉTMs des tubercules récoltés, même avec l'utilisation des doses les plus fortes, regroupées dans l'essai N (entre 5 et 12 t ha⁻¹) (tableaux 27 et 28). La seule exception est une légère hausse des teneurs en Zn dans les tubercules récoltés en 2007 dans l'essai P pour les doses intermédiaire et maximale de FSLP_c (tableaux 29 et 30). Toutefois, il faut considérer que les teneurs en Zn obtenues avec ces doses de FSLP_c, quoi qu'elles soient plus grandes que celles du témoin N_{min}, sont significativement plus basses que celles mesurées dans les tubercules des plants non fertilisés. De plus, cela ne se produit qu'une seule fois et pour un seul élément. Une situation similaire est rapportée par Moral et coll. (2006b) qui ont étudié au champ l'utilisation de FSLP brute centrifugée dans la culture du concombre et du chou. Les auteurs mentionnent que l'application de doses croissantes de FSLP, allant jusqu'à

23 t ha⁻¹ (b.h.) (équivalant à 20 et 11 t ha⁻¹ (b.h.) de FSLP_c selon les concentrations en Cu et Zn, respectivement), n'entraîne pas de hausse des teneurs en Cu, Fe et Mn pour les deux cultures. Seule une légère hausse du Zn est mesurée dans le fruit de concombre comparativement aux plants fertilisés avec les engrais minéraux. Cependant, tout comme dans notre étude, cette valeur est plus basse que dans le cas des plants non fertilisés. Cabral et coll. (1998), qui ont également testé l'application de doses allant jusqu'à 25 t ha⁻¹ (b.h.) de FSLP centrifugée (équivalant à 12,5 et 7,8 t ha⁻¹ (b.h.) de FSLP_c selon les concentrations en Cu et Zn, respectivement) dans la culture du blé, concluent également que les teneurs en Cu, Zn et Mn de la FSLP ne sont pas un facteur limitant pour son utilisation comme engrais organique.

Ainsi, puisque les teneurs en Zn à la fois des plants fertilisés avec la FSLP_c et avec l'engrais P_{min} sont sous les valeurs engendrées par le sol seul, cette exception nous semble peu problématique à court terme. Par contre, dans l'éventualité où une utilisation à long terme de la FSLP_c conduirait à un enrichissement des sols en ÉTMs, l'absorption des ÉTMs en plus grande quantité par la culture pourrait alors survenir, non pas à cause des doses employées, mais des teneurs en ÉTMs dans le sol. La possibilité d'un tel enrichissement des sols semble toutefois moins susceptible de survenir que suite à l'emploi de lisier brut puisque la FSLP_c présente un ratio P₂O₅/(Cu+Zn) (section 3.1.2) qui permet de combler les besoins en P des cultures tout en apportant beaucoup moins d'ÉTMs que la même fertilisation effectuée avec du lisier brut. Par ailleurs, les résultats pourraient aussi être différents en présence de cultures plus sensibles à l'accumulation des ÉTMs. En effet, toutes les plantes n'ont pas la même tolérance à la présence de Cu et Zn dans leurs tissus et n'utilisent pas les mêmes principes d'absorption. Certaines sont donc plus sensibles à l'accumulation des ÉTMs dans leurs tissus, tels certains légumes à feuilles (ex. : céleri, épinard, poivron vert) reconnus pour accumuler des concentrations relativement élevées de ÉTMs (Mohsen et Mohsen 2008). Dans le cas de la pomme de terre, les tubercules ont peu tendance à accumuler les ÉTMs, comparativement aux fanes, même lorsque soumis à de grands apports d'ÉTMs. Par exemple, dans une étude menée au Québec, Baziramakenga et Simard (2001) rapportent que l'application de compost de boues de désencrage à des doses allant jusqu'à 118 t ha⁻¹ (b.h.) sur un loam sableux dans la culture de la pomme de terre (cv 'Gold Rush') n'entraîne aucune hausse des teneurs en ÉTMs des tubercules récoltés. Quoi qu'il en soit, le choix du site et de la culture a toujours son importance vis-à-vis la décision de valoriser des AEOs. Dans le cas de la FSLP_c, les sols dont les teneurs en ÉTMs ne sont pas déjà surélevées et les cultures dont les parties consommées ne sont pas reconnues comme étant portées à l'accumulation d'ÉTMs, seront assurément un bon choix.

Enfin, le Cu et le Zn sont généralement considérés comme étant non toxiques, sauf à doses élevées dépassant 15 mg j⁻¹ pour le Cu, le Zn n'ayant aucune concentration maximale de fixée puisque plusieurs études démontrent que son ingestion, même en quantités très importantes sur une longue durée, n'entraîne aucun effet nocif (Santé Canada 2010ab). Selon la plus forte concentration en Cu des tubercules récoltés fertilisés avec la FSLP_c (1,25 mg kg⁻¹ à 78 % d'humidité; tableau 27), pour dépasser la dose maximale quotidienne recommandée, une personne devrait consommer 12 kg de pommes de terre à chaque jour; ce qui semble peu plausible. Pour le Zn, afin de combler uniquement les besoins quotidiens recommandés de 10 mg j⁻¹, une personne devrait ingérer 2,4 kg de pommes de terre. Une fois encore, cela semble peu probable.

Tableau 27. Impact de l'ajout de FSLP_c comme engrais azoté au sol sur les concentrations en ÉTMs et nitrates (b.s.) des tubercules à la récolte.

Traitements [†]	Al	Cu	Fe	Mn	Zn	N-NO ₃
	----- (mg kg ⁻¹) -----					
2007						
0 FS + PK	50,6	5,5	49,3	6,8	14,5	41,8
6 FS + PK	53,9	4,7	43,6	7,0	14,0	37,9
9 FS + PK	43,7	4,9	44,1	7,7	16,0	47,8
12 FS + PK	61,8	5,7	50,4	8,0	17,0	66,0
Témoin (NPK)	45,7	4,4	42,8	7,0	14,1	78,4
Combo (2,75 FS + NK)	62,7	5,1	42,2	7,1	13,9	72,6
2008						
0 FS + PK	42,2	4,6	49,4	6,2	18,4	79,6
5 FS + PK	42,3	4,3	45,6	6,7	15,7	70,4
7,5 FS + PK	48,3	4,3	46,7	6,7	16,9	56,2
10 FS + PK	47,0	4,8	46,7	7,2	19,3	72,7
Témoin (NPK)	50,7	4,0	54,1	6,6	16,2	116,7
Combo (2,0 FS + NK)	46,5	2,7	52,3	6,5	16,4	103,0

[†] Les valeurs présentées sont les moyennes ajustées au modèle statistique.

En regard des concentrations en N-NO₃, l'utilisation de la FSLP_c semble avantageuse en comparaison de l'engrais minéral. Ainsi, dans l'essai N, les concentrations en N-NO₃ des tubercules des parcelles fertilisées avec la FSLP_c ne sont pas significativement plus élevées que celles des tubercules produits dans les parcelles non fertilisées (contraste FSLP_c vs 0PK non significatif). Ceci n'est pas le cas pour les tubercules des parcelles fertilisées au N_{min}, qui présentent des teneurs en N-NO₃ 1,9 et 1,5 fois plus grandes en 2007 et 2008, respectivement, que celles des tubercules produits dans les parcelles non fertilisées (2007 : $P \leq 0,010$; 2008 : $P \leq 0,06$). De plus, à toutes les doses de FSLP_c étudiées, excepté celle de 12 t ha⁻¹, les teneurs en N-NO₃ des tubercules sont moindres que celles des tubercules des plants fertilisés avec le N_{min}. Des différences significatives atteignant jusqu'à un facteur de 2,1 sont rapportées aux tableaux 27 et 28. Ceci découle probablement du fait que dans l'engrais minéral, 100 % de l'azote est fourni sous forme inorganique, dont 50 % directement sous forme nitrique, et 50 % sous forme ammoniacale rapidement nitrifiée. À l'opposé, les plants fertilisés avec la FSLP_c, qui ne recevaient aucune autre source de N, ont reçu le N à 95 % sous forme organique. Les résultats de l'essai sur le P (tableaux 29 et 30) appuient cette explication puisque les tubercules produits dans les parcelles fertilisées avec la FSLP_c, qui recevaient alors un important complément de N_{min}, présentent des teneurs en N-NO₃ similaires à celles des tubercules des parcelles fertilisées au N_{min}. Cependant, dans tous les cas, les teneurs en nitrates des tubercules se classent dans la catégorie des légumes à faible apport de nitrates (Santamaria 2006).

Tableau 28. Analyses statistiques de l'impact de l'ajout de FSLP_c comme engrais azoté au sol sur les concentrations en ÉTMs et nitrates (b.s.) des tubercules à la récolte.

Sources de variation	2007						2008					
	Al	Cu	Fe	Mn	Zn	N-NO ₃	Al	Cu	Fe	Mn	Zn	N-NO ₃
Traitements [†]	ns	ns	ns	ns	ns	**	ns	ns	ns	ns	ns	*
Linéaire	-	-	-	-	-	ns	-	-	-	-	-	ns
Quadratique	-	-	-	-	-	ns	-	-	-	-	-	ns
FSLP _c vs NPK	-	-	-	-	-	**	-	-	-	-	-	*
FSLP _c vs 0PK	-	-	-	-	-	ns	-	-	-	-	-	ns
0 FS vs NPK [‡]	-	-	-	-	-	**	-	-	-	-	-	(0,0604)
70 % FS vs NPK	-	-	-	-	-	**	-	-	-	-	-	*
100 % FS vs NPK	-	-	-	-	-	**	-	-	-	-	-	**
130 % FS vs NPK	-	-	-	-	-	ns	-	-	-	-	-	*
Combo vs NPK	-	-	-	-	-	ns	-	-	-	-	-	ns

[†] Niveau de signification de l'analyse de variance : *, **, ***, ns indiquent significatif à $P \leq 0,05, 0,01, 0,001$, et non significatif, respectivement.
[‡] Comparaison des moyennes par la différence des moindres carrés. La dose de FS est exprimée en pourcentage d'équivalent minéral tel qu'estimé *a priori*.

Tableau 29. Impact de l'ajout de FSLP_c comme engrais phosphaté au sol sur les concentrations en ÉTMs et nitrates (b.s.) des tubercules à la récolte.

Traitements [†]	Al	Cu	Fe	Mn	Zn	N-NO ₃
	----- (mg kg ⁻¹) -----					
2007						
0 FS + NK	48,1	6,1	48,1	7,5	17,5	118,3
1,5 FS + NK	44,8	4,6	40,0	7,0	14,7	78,9
2,5 FS + NK	51,2	5,6	44,2	7,5	16,0	83,1
3,5 FS + NK	49,1	5,1	47,0	7,8	16,6	81,0
Témoin (NPK)	45,7	4,4	42,8	7,0	14,1	66,9
Combo (2,75 FS + NK)	62,7	5,1	42,2	7,1	13,9	72,6
2008						
0 FS + NK	42,1	4,4	43,6	6,7	17,0	163
1,25 FS + NK	41,9	3,7	61,6	6,9	16,7	109
1,75 FS + NK	47,0	3,2	56,7	6,6	16,5	109
2,5 FS + NK	50,8	4,6	47,5	6,8	17,7	111
Témoin (NPK)	50,7	4,0	54,1	6,6	15,1	117
Combo (2,0 FS + NK)	46,5	2,7	52,3	6,5	16,4	103

[†] Les valeurs présentées sont les moyennes ajustées au modèle statistique.

Tableau 30. Analyses statistiques de l'impact de l'ajout de FSLP_c comme engrais phosphaté au sol sur les concentrations en ÉTMs et nitrates (b.s.) des tubercules à la récolte.

Sources de variation	2007						2008					
	Al	Cu	Fe	Mn	Zn	N-NO ₃	Al	Cu	Fe	Mn	Zn	N-NO ₃
Traitements [†]	ns	ns	ns	ns	***	**	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Linéaire	-	-	-	-	ns	**	-	-	-	-	-	-
Quadratique	-	-	-	-	**	*	-	-	-	-	-	-
FSLP _c vs NPK	-	-	-	-	**	ns	-	-	-	-	-	-
FSLP _c vs NOK	-	-	-	-	*	***	-	-	-	-	-	-
0 FS vs NPK [‡]	-	-	-	-	***	***	-	-	-	-	-	-
60 % FS vs NPK	-	-	-	-	ns	ns	-	-	-	-	-	-
90 % FS vs NPK	-	-	-	-	*	ns	-	-	-	-	-	-
120 % FS vs NPK	-	-	-	-	**	ns	-	-	-	-	-	-
Combo vs NPK	-	-	-	-	ns	ns	-	-	-	-	-	-

[†] Niveau de signification de l'analyse de variance : *, **, ***, ns indiquent significatif à $P \leq 0,05, 0,01, 0,001$, et non significatif, respectivement.

[‡] Comparaison des moyennes par la différence des moindres carrés. La dose de FS est exprimée en pourcentage d'équivalent minéral tel qu'estimé *a priori*.

3.3 Évaluer l'impact de l'utilisation de FSLP_c sur les pools labiles de C, N et P du sol, de même que sur son taux d'activité biologique en cours de saison

3.3.1 Contenus en C, N et P labiles du sol

Les éléments dits labiles comprennent les nutriments inorganiques qui sont sous une forme directement assimilable par les plantes (ex. : nitrates, P_{eau}), ainsi que les nutriments organiques facilement minéralisables qui peuvent devenir rapidement disponibles à la culture (ex. : N_o et P_o). Le C_{eau} est aussi un élément facilement minéralisable. Celui-ci n'est pas impliqué directement dans la nutrition des plantes, puisque ces dernières fixent le C dont elles ont besoin par la photosynthèse. Cependant, il joue un rôle central dans la fertilité biologique des sols car il est considéré comme étant la source d'énergie accessible la plus efficace pour les microorganismes qui sont le moteur du cyclage des éléments labiles (McGill et coll. 1986). C'est pourquoi cet élément a été mesuré à la fois dans les volets N et P. Par ailleurs, les analyses ont été faites au stade 50-75 % de floraison, une des phases déterminantes dans l'établissement du potentiel de rendement final. C'est aussi la période de l'été où l'activité de minéralisation du sol atteint un pic.

Les résultats des analyses de sol révèlent tout d'abord que le contenu en C_{eau} a été principalement influencé par la quantité de FSLP_c apportée, très riche en carbone. Ainsi, en aucun temps, l'apport seul d'engrais minéral N ou P n'a fait augmenter les contenus en C_{eau} du sol, comparativement au sol témoin non fertilisé. Par ailleurs, dans l'essai sur le P, les doses de FSLP_c utilisées n'ont pas été assez importantes pour élever significativement les contenus en C_{eau} du sol (tableaux 33 et 34). La même constatation s'applique au traitement Combo, ce qui concorde avec le fait qu'il contient, à chacune des années, une dose de FSLP_c de l'ordre de grandeur de celle de l'essai sur le P. Par contre, dans l'essai sur le N, les doses ont entraîné une

hausse linéaire des contenus en C_{eau} du sol. En 2007, les sols ayant reçu de la FSLP_c tendaient à contenir de 7 à 24 % plus de C_{eau} que le sol fertilisé au N_{min} (effet traitement à $P < 0,10$). En 2008, cette hausse était très significative (effet linéaire à $P < 0,001$). Les sols ayant reçu les doses intermédiaire et maximale avaient un contenu en C_{eau} de 23 et 34 % supérieur, respectivement, au sol témoin non fertilisé ou ayant reçu du N_{min} (tableaux 31 et 32).

L'évolution des contenus en N_0 minéralisable, telle que mesurée par les tests d'incubation, tend à suivre celle du C_{eau} . Les deux années, l'apport de FSLP_c a entraîné une hausse linéaire des contenus en N_0 du sol (tableau 32). En 2007, l'effet est très marqué. Les sols ayant reçu de la FSLP_c contenaient de 25 à 143 % plus de N_0 que le sol fertilisé au N_{min} (effet linéaire à $P < 0,001$). En 2008, bien que la différence soit moins significative, les sols fertilisés avec la FSLP_c avaient tout de même des contenus en N_0 jusqu'à 22 % plus grands que ceux du sol fertilisé au N_{min} (effet linéaire à $P < 0,07$). Le N_0 labile dans les sols est un élément très intéressant car sa minéralisation fournit des nitrates qui sont directement assimilables par les plantes, tout comme ceux des engrais minéraux. Cependant, puisque sa minéralisation est échelonnée dans le temps, le N_0 présente l'avantage de se comporter comme un engrais à libération lente. Contrairement aux engrais minéraux classiques, qui libèrent rapidement par dissolution l'ensemble des nitrates qu'ils contiennent suite à leur application, le N_0 fournit donc des nitrates durant toute la saison. Puisque les nitrates sont facilement lessivables, leur apport progressif au moment où la culture en a besoin est donc avantageux puisque cela minimise le risque qu'ils soient lessivés en début de saison, laissant la culture en état de sous fertilisation. Ceci est un atout important dans la culture de la pomme de terre puisque les sols majoritairement utilisés pour cette production sont sableux et très propices à la perte des nitrates. En moyenne, seuls 45 % du N appliqué est prélevé par les tubercules (Greenwood et coll. 1985, Tran et Giroux 1991). Ainsi, des recherches menées au Québec ont démontré que les champs de pommes de terre perdaient jusqu'à $116 \pm 40 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ par lessivage (Gasser et coll. 2002).

L'évolution des mesures de $N\text{-NO}_3$ se calque sur celle du N_0 . Ainsi, en 2007, l'apport de FSLP_c a entraîné une hausse linéaire très significative des contenus en $N\text{-NO}_3$ du sol (effet linéaire à $P < 0,01$). Les hausses sont du même ordre de grandeur que pour le N_0 , avec des contenus en $N\text{-NO}_3$ de 12 à 153 % plus élevés dans les sols ayant reçu de la FSLP_c, comparativement au sol fertilisé au N_{min} . Puisque dans les traitements de FSLP_c aucun engrais minéral N n'a été ajouté, les $N\text{-NO}_3$ ne peuvent venir principalement que de la minéralisation du N_0 . Ces hausses importantes de $N\text{-NO}_3$ suite à l'apport de doses croissantes de FSLP_c sont donc la preuve de l'efficacité de minéralisation du N_0 contenu dans la FSLP_c. Ces résultats appuient les hauts CE préliminaires du N de la FSLP_c calculés aux stades bouton et floraison pour 2007 (tableau 17). En 2008, comme pour le N_0 , les différences sont moins marquées. En fait, il n'y a pas de différence significative entre les contenus en $N\text{-NO}_3$ des sols fertilisés avec la FSLP_c et l'engrais N_{min} . Ceci demeure toutefois un résultat très intéressant puisque cela démontre que la FSLP_c peut maintenir la disponibilité en $N\text{-NO}_3$ du sol au même niveau que l'engrais minéral, quand elle ne contribue pas à l'élever davantage. Les CE du N de la FSLP_c calculés en 2008 aux stades bouton et floraison étaient d'ailleurs tout aussi bons que ceux de 2007 (tableau 17). Cependant, c'est le traitement Combo qui a généré les plus fortes teneurs à la fois en N_0 et en $N\text{-NO}_3$, comparativement au sol témoin NPK et à ceux fertilisés avec la FSLP_c. Ces hausses sont non seulement très significatives, mais elles sont très constantes d'une année à l'autre. Il semble donc y avoir une synergie entre l'engrais minéral N et la FSLP_c sur la disponibilité du N. Il se peut en effet que la présence de C labile ait permis de soutenir une forte croissance de la

biomasse microbienne. Cette biomasse active a pu à son tour transformer rapidement par incorporation les nitrates inorganiques fournis par l'engrais minéral en N_0 labile microbien. Cependant, cette disponibilité ne s'est pas traduite par un meilleur prélèvement en N des plants fertilisés avec le Combo plutôt qu'avec le N_{min} seul.

La détermination du N_0 par la méthode du N_{hydro} n'a pas permis de dégager de différence entre les traitements contrairement à la méthode par incubation. Cette absence de résultat pourrait être due au fait que la méthode du N_{hydro} n'extrait pas tout le N_0 puisque le type et la quantité de N_0 extrait dépendent de l'extractif utilisé. Une partie du N_0 de la FSLP_c qui participe à l'effet azoté peut donc ne pas avoir été dosée. De plus, la minéralisation du N_0 requiert la présence dans le sol de microorganismes aptes à effectuer cette action et cet aspect n'est pas tenu en compte dans la méthode du N_{hydro} . Par contre, dans le cas des tests d'incubation, les sols sont incubés dans des conditions d'humidité et de température qui maximisent l'activité des microorganismes. Les nitrates mesurés sont donc directement générés par la minéralisation du N_0 présent dans le sol par les microorganismes indigènes. Le potentiel de minéralisation du N_0 mesuré par cette méthode nous apparaît donc comme étant plus révélateur de ce qui a pu se passer au champ, d'autant plus que les résultats obtenus vont dans le même sens que les mesures des sols et des plantes effectuées conjointement.

Tableau 31. Impact de l'ajout de FSLP_c comme engrais azoté au sol sur les contenus (b.s.) en C et N labiles du sol au stade 50-75 % de floraison, étés 2007 et 2008.

Traitements [†]	C_{eau} ----- (mg kg ⁻¹) -----	N-NO ₃ ----- (mg kg ⁻¹) -----	N_0 labile -----	
			$\Delta N-NO_3^{\ddagger}$ ----- (mg kg ⁻¹) -----	N_{hydro} (260nm) ----- absorbance -----
2007				
0 FS + PK	130	4,3	5,9	0,23
6 FS + PK	135	5,8	6,6	0,23
9 FS + PK	145	9,1	9,3	0,25
12 FS + PK	156	13,2	12,9	0,25
Témoin (NPK)	126	5,2	5,3	0,22
Combo (2,75 FS + NK)	121	22,0	11,6	0,22
2008				
0 FS + PK	105	1,7	4,8	0,22
5 FS + PK	104	2,1	6,5	0,23
7,5 FS + PK	132	2,4	6,6	0,24
10 FS + PK	143	2,4	6,5	0,23
Témoin (NPK)	107	2,3	5,4	0,21
Combo (2,0 FS + NK)	97	21,3	11,9	0,22

[†] Les valeurs présentées sont les moyennes ajustées au modèle statistique.

[‡] Estimation du N_0 par libération des nitrates lors du test de minéralisation par incubation des sols pendant 20 jours.

Tableau 32. Analyses statistiques de l'impact de l'ajout de FSLP_c comme engrais azoté au sol sur les contenus (b.s.) en C et N labiles du sol au stade 50-75 % de floraison, étés 2007 et 2008.

Sources de variation	2007				2008			
	C _{eau}	N-NO ₃	ΔN-NO ₃	N _{Hydro}	C _{eau}	N-NO ₃	ΔN-NO ₃	N _{Hydro}
Traitements [†]	(0,0970)	***	*	ns	***	***	***	ns
Linéaire	(*)	***	**	-	***	(0,0872)	(0,0654)	-
Quadratique	(ns)	ns	ns	-	*	ns	ns	-
FSLP _c vs NPK	(0,0753)	**	*	-	**	ns	(0,0739)	-
FSLP _c vs OPK	(ns)	**	*	-	**	ns	**	-
0 FS vs NPK [‡]	ns	ns	ns	-	ns	ns	ns	-
70 % FS vs NPK	ns	ns	ns	-	ns	ns	ns	-
100 % FS vs NPK	ns	*	ns	-	**	ns	ns	-
130 % FS vs NPK	*	***	**	-	***	ns	ns	-
Combo vs NPK	ns	***	*	-	ns	**	***	-

[†] Niveau de signification de l'analyse de variance : *, **, ***, ns indiquent significatif à $P \leq 0,05, 0,01, 0,001$, et non significatif, respectivement.

[‡] Comparaison des moyennes par la différence des moindres carrés. La dose de FS est exprimée en pourcentage d'équivalent minéral tel qu'estimé *a priori*.

En ce qui a trait à la fertilisation phosphatée, la minéralisation d'éléments organiques labiles ne semble pas être directement impliquée. En effet, tel que mentionné précédemment, les contenus en C_{eau} n'ont pas été haussés par l'apport de FSLP_c. De plus, les tests d'incubation ne démontrent pas que le P_o contribue significativement à la nutrition en P de la culture. Ceci concorde avec le fait que le contenu en P_{tot} de la FSLP_c est à 90 % sous forme minérale (tableau 4). De plus, l'impact de l'application de FSLP_c semble, dans les faits, être beaucoup plus lié à une hausse de la disponibilité du P présent dans le sol plutôt qu'à l'augmentation de son contenu comme tel. Cette hypothèse est appuyée par les résultats de P_{M3} et de P_{eau} (tableaux 31 et 32). Le P_{M3} est une mesure de la quantité de P potentiellement disponible pendant la saison, tandis que le P_{eau} est une mesure d'intensité du P en solution du sol, i.e. non fixé et directement disponible au prélèvement par les racines. Comme on peut le voir au tableau 33, la quantité de P_{M3} n'a pas été augmentée, malgré l'apport de grandes quantités de P_{tot} par la FSLP_c. Par contre, les concentrations en P_{eau} ont augmenté avec les doses de FSLP_c. Ainsi, en 2007, le P_{eau} tend à être près de deux fois plus élevé avec la plus forte dose de FSLP_c, comparativement au sol témoin P_{min}. En 2008, cette hausse des concentrations en P_{eau} suite à l'apport de doses croissantes de FSLP_c est très significative (effet linéaire à $P < 0,01$). Les sols des parcelles ayant reçu la FSLP_c avaient donc un contenu en P_{eau} de 24 à 135 % supérieur à celui du sol fertilisé au P_{min}. Cette hausse du P accessible en solution du sol concorde de plus avec les très fortes valeurs atteintes par les CE du P de FSLP_c aux stades bouton et floraison (tableau 20), qui dépassent les 200 % et démontrent que le P était effectivement très disponible.

D'une part, cette hausse du P_{eau} pourrait être liée à la nature du P contenu dans les fèces de porcs. Des études de caractérisation biochimique de divers AEOs ont en effet montré que le fumier solide brut de porcs est particulièrement riche en P extractible à l'eau. Comparativement aux biosolides papetiers et aux fumiers de vaches dont 10 et 20 % du P_{tot} étaient extractibles à l'eau, respectivement, le fumier de porcs présentait de 30 à 43 % de P_{eau} (Dou et coll. 2002, Ajiboye et coll. 2004). Toutefois, dans notre étude, les analyses de caractérisation biochimique de la FSLP_c ont révélé que seulement 2,3 % du P_{tot} était sous forme de P_{eau}. L'effet bénéfique de

l'application de FSLP_c sur l'évolution du P_{eau} du sol a donc probablement plus à voir avec l'ajout conjoint de composés qui retardent la fixation et/ou haussent la solubilité du P. Cette hausse de disponibilité est un atout majeur car le P est un élément qui devient très rapidement immobilisé dans le sol. Ainsi, bien que les sols contiennent en général de très grandes quantités totales de P, une toute petite portion seulement est disponible à la culture. De plus, le P soluble ajouté aux sols agricoles par les engrais n'est souvent disponible que pour un court laps de temps car il évolue rapidement vers des formes de moins en moins bio-disponibles (rétroversion). Suivant l'application des engrais, les granules se dissolvent pour libérer des ions orthophosphates (H₂PO₄⁻ et HPO₄²⁻) dans la solution du sol. Toutefois, ceux-ci sont très réactifs et réagissent rapidement avec les composés du sol. Ils sont soit adsorbés sur les sites de fixation présents sur les complexes d'échange ou précipitent sous forme de minéraux peu solubles suite à leur réaction avec des formes de Fe et d'Al libres en solution.

Ainsi, si les engrais minéraux phosphatés ont un pourcentage d'efficacité initial qui est généralement supérieur à 95 % suite à leur application au sol (Tisdale et coll. 1993), 70 à 90 % auront été immobilisés par adsorption sur les composantes du sol (Prasad et Power 1997). Cette rétroversión est particulièrement prononcée dans les sols québécois consacrés à la culture de la pomme de terre. Ceux-ci sont majoritairement podzolisés et donc très fixateurs. En conséquence, des études québécoises démontrent que seulement 5 à 20 % de la dose de P apportée par les engrais de synthèse sera habituellement disponible aux cultures la première année d'application (Giroux 1993 cité dans Provencher 2003, Khiari et Parent 2005). De tels résultats concordent avec ceux de notre étude. En effet, en 2007 et 2008, seulement 6 et 9 semaines après l'application en bande des 150 kg ha⁻¹ de P₂O₅ (0-46-0), les sols sur la butte ne contenaient plus que 14 et 9 kg (b.h.) ha⁻¹ de P₂O₅ extractible à l'eau, respectivement. Ceci ne représente que 9 et 6 % du P₂O₅ soluble appliqué à la plantation et les prélèvements en P₂O₅ par les plants, d'environ 8 kg ha⁻¹ à chacune des années à ce stade, n'expliquent pas cette grande différence. Khiari et Parent (2005) qui ont étudié en laboratoire la transformation du P d'un sol acide léger à pommes de terre selon des apports de fumier de porcs déshydraté (FPD), arrivent à une conclusion similaire. Après seulement 6 semaines d'incubation, ils rapportent que l'apport de FPD a fait diminuer le taux de fixation du P disponible provenant du phosphate mono ammoniacal (MAP) par l'Al de 79 à 35 % et a haussé la fraction la plus labile de P de 5 à 34 %. L'effet a été particulièrement marqué sur le P_{eau}. Les auteurs concluent ainsi que les ligands organiques contenus dans le FPD contribuent à diminuer la fixation du P par l'Al dans le sol, ce qui pourrait en conditions de champ améliorer l'absorption du P par les racines. Erich et coll. (2002), qui ont comparé la chimie du P des sols en culture de pommes de terre ayant reçu des composts, des fumiers ou aucun amendement durant 6 années consécutives, rapportent également que le P_{eau} était plus haut dans les sols amendés que non amendés, de même que le C_{eau}. Plusieurs autres études menées en sols québécois ont aussi démontré l'utilité d'ajouter des ligands organiques afin de diminuer la fixation du P par les composantes du sol. Par exemple, Zheng et coll. (2001) rapportent que pour une même quantité de P apportée sous forme de P_{min} ou de lisier de porcs, le P disponible dans le sol augmente davantage suite à l'apport de lisier de porcs. De même, Baziramakenga et coll. (2001), qui ont étudié l'influence d'apports de fumier de poulets sur un loam sableux dans la culture de la pomme de terre, ont démontré que l'application conjointe de fumier et d'engrais P_{min} permettait de hausser davantage le P disponible du sol que l'ajout de P_{min} seul, bien que des quantités égales de P aient été apportées. Le fumier favorisait particulièrement la solubilité résiduelle du P_{min} apporté.

La matière organique présente dans la FSLP_c semble donc, même à court terme, avoir atténué les mécanismes de rétroversion des ions phosphates et favorisé la formation de produits de réaction du P plus solubles, ce qui a été bénéfique à l'utilisation du P par la culture. Deux principaux modes d'action pourraient être impliqués. Premièrement, les molécules organiques peuvent spécifiquement se sorber sur les sites de fixation du P des particules de sol, entrant ainsi en compétition avec le P_i (Figure 2) (Fox 1995). En effet, les ligands organiques contiennent des groupements fonctionnels comme -OH et -COOH qui entrent en compétition avec les phosphates aux sites d'adsorption des colloïdes du sol (Fox et coll. 1990). Deuxièmement, la matière organique soluble peut se complexer avec le Fe et l'Al libres pour former des composés organo-minéraux solubles, ce qui diminue le taux de réaction du P_i avec l'Al et le Fe libres dans la solution du sol et hausse la dissolution des phosphates de Fe et d'Al qui relâchent alors du P.

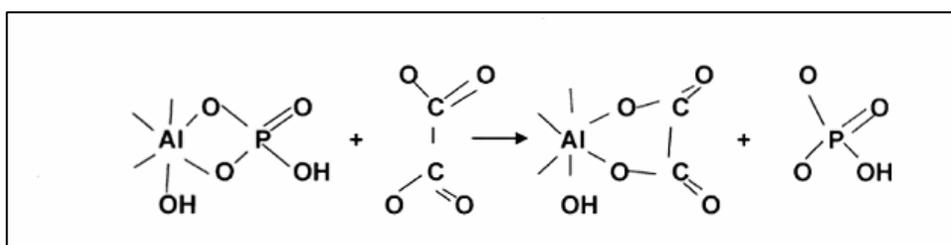


Figure 2. Compétition entre un acide organique (l'oxalate) et un orthophosphate sur un site de fixation aluminium du P (adaptée de Fox 1995).

Tableau 33. Impact de l'ajout de FSLP_c comme engrais phosphaté au sol sur les contenus (b.s.) en C et P labiles du sol au stade 50-75 % de floraison, étés 2007 et 2008.

Traitements [†]	C _{eau}	P _{eau}	P _{M3}	----- P _o labile ----- Δ P _{eau} [‡]
	----- (mg kg ⁻¹) -----			----- (mg kg ⁻¹) -----
2007				
0 FS + NK	127	2,20	87,2	0
1,5 FS + NK	121	2,84	96,4	0
2,5 FS + NK	124	2,92	94,9	0
3,5 FS + NK	137	4,93	113,7	0
Témoin (NPK)	126	2,75	89,6	0
Combo (2,75 FS + NK)	121	2,22	80,7	0
2008				
0 FS + NK	104	1,3	76,6	0,49
1,25 FS + NK	101	2,1	90,9	0,13
1,75 FS + NK	120	2,5	92,8	0,04
2,5 FS + NK	91	4,0	113,6	0,00
Témoin (NPK)	107	1,7	92,8	0,83
Combo (2,0 FS + NK)	97	1,4	80,8	0,80

[†] Les valeurs présentées sont les moyennes ajustées au modèle statistique.

[‡] Libération des phosphates lors du test de minéralisation par incubation de 20 jours.

Tableau 34. Analyses statistiques de l'impact de l'ajout de FSLP_c comme engrais phosphaté au sol sur les contenus (b.s.) en C et P labiles du sol au stade 50-75 % de floraison, étés 2007 et 2008.

Sources de variation	2007				2008			
	C _{eau}	P _{eau}	ΔP _{eau}	P _{M3}	C _{eau}	P _{eau}	ΔP _{eau}	P _{M3}
Traitements [†]	ns	ns	ns	ns	ns	*	***	ns
Linéaire	-	-	-	-	-	**	**	-
Quadratique	-	-	-	-	-	ns	ns	-
FSLP _c vs NPK	-	-	-	-	-	(0,0814)	***	-
FSLP _c vs NOK	-	-	-	-	-	*	*	-
0 FS vs NPK [‡]	-	-	-	-	-	ns	ns	-
60 % FS vs NPK	-	-	-	-	-	ns	**	-
90 % FS vs NPK	-	-	-	-	-	ns	**	-
120 % FS vs NPK	-	-	-	-	-	*	***	-
Combo vs NPK	-	-	-	-	-	ns	ns	-

[†] Niveau de signification de l'analyse de variance : *, **, ***, ns indiquent significatif à $P \leq 0,05, 0,01, 0,001$, et non significatif, respectivement.

[‡] Comparaison des moyennes par la différence des moindres carrés. La dose de FS est exprimée en pourcentage d'équivalent minéral tel qu'estimé *a priori*.

3.3.2 Activités enzymatiques et potentiel métabolique du sol

Les enzymes présents dans les sols agricoles répondent plus rapidement que bien d'autres variables du sol aux modifications des pratiques culturales (Bandick et Dick 1999). Ceux-ci peuvent donc servir d'indicateurs hâtifs des changements liés à la fertilité biologique des sols agricoles (Masciandaro et coll. 2004). Dans la présente étude, ceux-ci confirment, en accord avec les résultats rapportés sur l'évolution des pools de N et P labiles du sol (tableaux 31 et 33), que la nutrition N par la FSLP_c fait intervenir directement l'activité biologique des sols, mais pas la nutrition P. En effet, dans le sol des parcelles de l'essai N, il y a une hausse linéaire marquée du dégagement de CO₂ (2007 et 2008 : $P < 0,05$) et de l'uréase (2007 : $P < 0,001$; 2008 : $P < 0,05$) à chacune des années (tableaux 35 et 36). Par contre, dans l'essai P, aucune des activités enzymatiques n'est modifiée. Par ailleurs, dans les sols fertilisés au N_{min}, toutes les activités enzymatiques mesurées (tableau 35) présentent des valeurs similaires à celles du sol non fertilisé, à chacune des années (0 FS vs NPK : ns) (tableau 36). Dans le cas du traitement Combo, la dose de FSLP_c utilisée n'a pas non plus été suffisante pour hausser les variables étudiées, à l'instar des doses employées dans l'essai P (tableaux 37 et 38).

Ainsi, dans l'essai N, les sols prélevés au champ à la floraison et incubés 20 jours, dans lesquels une accumulation plus élevée de nitrates a été rapportée suite à l'apport de FSLP_c (section 3.3.1), ont aussi dégagé de 6 à 24 % plus de CO₂ à chacune des années que le sol fertilisé avec le N_{min}. À ce stade, l'activité uréase de ces sols était aussi de 25 à 45 % et de 19 à 25 % plus élevée en 2007 et 2008, respectivement, que dans le sol fertilisé au N_{min}. Considérant que le dégagement de CO₂ est un indicateur fiable du taux respiratoire microbien (taux d'activité) et que l'uréase microbienne est directement impliquée dans la minéralisation du N_o, l'interprétation conjointe de ces deux mesures indique que la FSLP_c fournit du N_o très labile, dont la minéralisation est favorisée via l'apport conjoint de C_{eau} qui stimule l'activité microbienne (tableau 31). La production de nitrates dans les sols fertilisés avec la FSLP_c est donc bel et bien

liée à la minéralisation du N_o par les microorganismes du sol. La minéralisation y était donc beaucoup plus intense que dans les parcelles N_{min} et probablement beaucoup plus impliquée dans la nutrition de la culture.

Plusieurs études effectuées en conditions culturales québécoises, portant sur la valorisation de divers AEOs (ex. : boues mixtes de papetières, boues de désencrage, fumier solide de bovins, fumier séché de poulets, mélange boues de papetières et fumier de porcs composté), rapportent également une hausse de l'activité uréase et du taux respiratoire microbien dans les sols suite à l'apport de doses croissantes des produits organiques (Gagnon et coll. 2000, Baziramakenga et coll. 2001, Lalande et coll. 2003, N'Dayegamiye et coll. 2005, N'Dayegamiye 2006). Par exemple, lors d'une étude au champ de trois ans, N'Dayegamiye et coll. (2004a) rapportent que les apports de fumier solide ont accru les quantités de CO_2 dégagées par les microorganismes du sol. De même, Rochette et coll. (2000) rapportent que l'application de lisier de porcs dans une culture de maïs ensilage provoque une hausse rapide du contenu en C_{eau} du sol, accompagnée à la mi-juillet d'un pic de respiration. Les auteurs attribuent ces hausses à une augmentation rapide de la biomasse et de l'activité microbienne. Nos résultats concordent aussi avec ceux de Bol et coll. (2003), qui ont démontré que les contenus en C_{eau} des sols sont plus élevés lorsque les sols sont fertilisés au lisier de porcs plutôt qu'avec des engrais minéraux et que le C_{eau} apporté par le lisier est très rapidement incorporé dans la biomasse microbienne du sol dont l'activité est augmentée. Enfin, Guerrero et coll. (2007), qui ont également étudié l'impact de l'apport de FSLPs (compostées et non compostées) sur les taux de minéralisation du N et la biomasse microbienne du sol confirment que le C de la FSLP se minéralise facilement. En fait, lors d'incubations en laboratoire, 45 % du C_{tot} de leur FSLP était minéralisé dans les 163 jours d'incubation. L'apport de FSLP était suivi d'une hausse marquée de la respiration microbienne et du taux de minéralisation du N, et accompagné d'une hausse progressive du contenu en nitrates dans le sol. Notre étude révèle de plus que non seulement la FSLP_c fournit du N_i aux plants par minéralisation du N_o , mais qu'elle le fait particulièrement rapidement. Cordovil et coll. (2007), qui ont étudié en serres l'apport de N de divers AEOs, incluant une FSLP séparée par centrifugation, arrivent au même constat. Leur expérience démontre en effet que parmi les AEOs étudiés, la FSLP a démontré un relâchement initial rapide de N par minéralisation. Les auteurs rapportent aussi que les plants présentaient une excellente nutrition N dès le début de l'expérience. Cette propriété du N_o de la FSLP_c, d'être minéralisé rapidement, expliquerait les excellents CE préliminaires et prélèvements en N réalisés dès le stade bouton, malgré le fait que 95 % du N apporté soit d'origine organique (tableau 17).

Dans le cas de l'essai P, l'absence de différence significative pour les activités phosphatases acide et alcaline (tableaux 37 et 38) confirme les observations rapportées pour le P labile (section 3.3.1) et indique que le prélèvement intensif de P par les plants suite à l'apport de FSLP_c (tableau 20) ne repose pas sur la minéralisation du P_o . Ceci concorde avec l'absence de libération de P_{eau} lors des tests d'incubation (tableau 33) et avec le fait que 90 % du P_{tot} de la FSLP_c est sous forme inorganique (tableau 4). Lors d'une étude au champ de trois ans sur la valorisation des boues mixtes de papetières et du fumier de bovins, N'Dayegamiye et coll. (2004a) rapportent également qu'aucune différence n'a été mesurée au niveau des activités phosphatases du sol, bien que les rendements aient été augmentés significativement suite à l'apport de ces AEOs. Il ne faut toutefois pas en déduire que le P_o ne joue aucun rôle dans l'établissement de la nutrition P suite à l'apport de la FSLP_c. En effet, de la même façon que les composés organiques peuvent hausser la solubilité du P_i du sol, le P_o , tant celui apporté par la

FSLP_c que celui généré par réorganisation du P_i en P_o par la biomasse microbienne, peut compétitionner lui aussi pour les sites de fixation du P_i sur les composantes du sol.

Tableau 35. Impact de l'ajout de FSLP_c comme engrais azoté au sol sur les activités enzymatiques (b.s.) des cycles du C et du N des sols au stade 50-75 % de floraison, étés 2007 et 2008.

Traitements [†]	Uréase -- (ug N-NH ₄ g ⁻¹) --	ΔCO ₂ [‡] ---- (mg CO ₂ g ⁻¹) ----	Déshydrogénase ----- (ug TPF g ⁻¹) ----	IMP
2007				
0 FS + PK	19,2	0,36	37,5	284
6 FS + PK	22,4	0,36	43,0	315
9 FS + PK	20,5	0,37	40,7	284
12 FS + PK	23,8	0,42	48,5	319
Témoin (NPK)	16,4	0,34	41,7	328
Combo (2,75 FS + NK)	18,2	0,28	34,3	279
2008				
0 FS + PK	17,2	0,18	17,1	170
5 FS + PK	22,2	0,18	24,3	232
7,5 FS + PK	21,0	0,21	26,2	203
10 FS + PK	22,0	0,21	27,7	187
Témoin (NPK)	17,6	0,17	23,1	232
Combo (2,0 FS + NK)	18,5	0,18	21,0	223

[†] Les valeurs présentées sont les moyennes ajustées au modèle statistique.

[‡] Libération de CO₂ lors du test de minéralisation par incubation de 20 jours.

Tableau 36. Analyses statistiques de l'impact de l'ajout de FSLP_c comme engrais azoté au sol sur les activités enzymatiques (b.s.) des cycles du C et du N des sols au stade 50-75 % de floraison, étés 2007 et 2008.

Sources de variation	2007				2008			
	Uréase	ΔCO ₂ [‡]	Déshydrogénase	IMP	Uréase	ΔCO ₂ [‡]	Déshydrogénase	IMP
Traitements [†]	**	**	ns	ns	**	**	*	ns
Linéaire	*	*	-	-	***	*	**	-
Quadratique	ns	ns	-	-	ns	ns	ns	-
FSLP _c vs NPK	***	*	-	-	***	**	ns	-
FSLP _c vs OPK	*	ns	-	-	***	(0,0985)	**	-
0 FS vs NPK [§]	ns	ns	-	-	ns	ns	ns	-
70 % FS vs NPK	**	ns	-	-	***	ns	ns	-
100 % FS vs NPK	*	ns	-	-	**	**	ns	-
130 % FS vs NPK	***	**	-	-	**	**	(0,1231)	-
Combo vs NPK	ns	*	-	-	ns	ns	ns	-

[†] Niveau de signification de l'analyse de variance : *, **, ***, ns indiquent significatif à $P \leq 0,05, 0,01, 0,001$, et non significatif, respectivement.

[‡] Libération de CO₂ lors du test de minéralisation par incubation de 20 jours.

[§] Comparaison des moyennes par la différence des moindres carrés. La dose de FS est exprimée en pourcentage d'équivalent minéral tel qu'estimé *a priori*.

Tableau 37. Impact de l'ajout de FSLP_c comme engrais phosphaté au sol sur les activités enzymatiques (b.s.) des cycles du C et du P des sols au stade 50-75 % de floraison, étés 2007 et 2008.

Traitements [†]	----- Phosphatases -----		ΔCO ₂ [‡] --- (mg CO ₂ g ⁻¹) ---	Déshydrogénase ---- (ug TPF g ⁻¹) ----	IMP
	Acide	Alcaline			
	----- (ug PNP g ⁻¹) -----				
2007					
0 FS + NK	322	81,1	0,33	40,3	319
1,5 FS + NK	275	69,6	0,37	38,4	305
2,5 FS + NK	292	69,7	0,34	41,9	303
3,5 FS + NK	292	82,5	0,38	41,4	304
Témoin (NPK)	299	70,2	0,34	41,8	328
Combo (2,75 FS + NK)	284	72,3	0,30	34,3	278
2008					
0 FS + NK	322	65,7	0,20	26,5	272
1,25 FS + NK	315	56,5	0,18	23,7	256
1,75 FS + NK	320	69,2	0,20	27,9	233
2,5 FS + NK	300	64,7	0,18	26,7	309
Témoin (NPK)	315	58,8	0,18	28,7	262
Combo (2,0 FS + NK)	305	60,7	0,18	21,0	223

[†] Les valeurs présentées sont les moyennes ajustées au modèle statistique.

[‡] Libération de CO₂ lors du test de minéralisation par incubation de 20 jours.

Tableau 38. Analyses statistiques de l'impact de l'ajout de FSLP_c comme engrais phosphaté au sol sur les activités enzymatiques (b.s.) des cycles du C et du P des sols au stade 50-75 % de floraison, étés 2007 et 2008.

Sources de variation	----- 2007 -----					----- 2008 -----				
	-Phosphatases-		ΔCO ₂ [‡]	Déshydrogénase	IMP	-Phosphatases-		ΔCO ₂ [‡]	Déshydrogénase	IMP
	Acide	Alcaline				Acide	Alcaline			
Traitements [†]	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Linéaire	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Quadratique	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
FSLP _c vs NPK	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
FSLP _c vs N0K	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0 FS vs NPK [§]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
60 % FS vs NPK	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
90 % FS vs NPK	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
120 % FS vs NPK	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Combo vs NPK	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

[†] Niveau de signification de l'analyse de variance : *, **, ***, ns indiquent significatif à $P \leq 0,05, 0,01, 0,001$, et non significatif, respectivement.

[‡] Libération de CO₂ lors du test de minéralisation par incubation de 20 jours.

[§] Comparaison des moyennes par la différence des moindres carrés. La dose de FS est exprimée en pourcentage d'équivalent minéral tel qu'estimé *a priori*.

3.4 Évaluer l'impact de l'utilisation de FSLP_c sur les paramètres agronomiques, de même que sur les contenus en éléments traces métalliques et en *E. coli* du sol à la récolte

3.4.1 État des paramètres agronomiques du sol à la récolte

Étant donné la concentration des éléments P_{tot}, Ca et Mg dans la FSLP_c lors de la centrifugation des lisiers, un enrichissement des sols en ces éléments était anticipé. Un enrichissement en Mg et une hausse de la saturation en P ont effectivement été constatés. Cependant, la majorité des différences a été observée dans l'essai N (5 à 12 t ha⁻¹) (tableaux 39 et 40), dont les doses de FSLP_c étaient beaucoup plus importantes que celles de l'essai P (1,5 à 3,5 t ha⁻¹). Ainsi, dans le cas du Mg, des hausses significatives ont été mesurées à chacune des années dans l'essai N et en 2008 dans l'essai P. En 2007, les teneurs en Mg des parcelles du volet N fertilisées avec la FSLP_c étaient de 28 à 117 % supérieures à celles du sol témoin NPK. En 2008, les variations étaient similaires, allant de 80 à 174 %. Toujours en 2008, mais dans l'essai P, l'enrichissement en Mg allait de 41 à 70 % dans les sols fertilisés avec la FSLP_c comparativement au sol témoin NPK. Dans le cas des teneurs en P du sol, des enrichissements ont été notés pour les contenus en P_{M3}, P_{eau} et pour le degré de saturation en P (DSP) dans les sols de l'essai N uniquement. Selon les années, l'ensemble des doses ou seules les deux plus élevées entraînaient ces enrichissements qui se situaient entre 31 et 34 % selon les années et les traitements (tableau 39). Une telle hausse du contenu en P disponible du sol suite à l'application de doses de FSLP centrifugée a aussi été rapportée lors d'études menées en pots avec des cultures de blé et de maïs-grain (Vasconcelos et Cabral 1996, Vasconcelos et coll. 1997).

Tableau 39. Impact de l'ajout de FSLP_c comme engrais azoté au sol sur les paramètres agronomiques (b.s.) du sol à la récolte, étés 2007 et 2008.

Traitements [†]	pH	---- MO ----		C _{eau}	P _{eau}	N _{hydro} (260nm)	N _{tot}	----- Éléments Mehlich-3 -----				
		total	labile					P	K	Ca	Mg	DSP [‡]
		----- (%) -----		--- (mg kg ⁻¹) ---	absorbance	----- kg ha ⁻¹ -----					-- (%) --	
2007												
0 FS + PK	6,0	3,8	0,43	157	3,8	0,36	3662	200	235	1856	86,1	5,7
6 FS + PK	6,0	4,1	0,44	156	4,8	0,37	4004	225	241	2156	137,7	6,6
9 FS + PK	6,0	4,0	0,50	171	4,2	0,40	3797	219	230	1956	90,9	6,4
12 FS + PK	6,0	3,8	0,41	163	5,0	0,39	3674	229	172	1873	154,1	6,5
Témoin (NPK)	6,0	3,9	0,40	152	2,1	0,34	3584	171	220	1742	71,0	4,9
Combo (2,75 FS + NK)	5,9	4,0	0,37	145	2,0	0,36	3668	162	186	1855	95,2	4,5
2008												
0 FS + PK	6,0	3,8	0,43	119	2,9	0,28	3786	221	191	1674	81,0	6,1
5 FS + PK	6,1	3,6	0,39	102	4,1	0,26	3690	253	163	1854	135,6	7,2
7,5 FS + PK	6,1	3,8	0,50	128	5,9	0,31	3713	283	171	1939	170,2	7,8
10 FS + PK	6,2	3,8	0,44	134	5,9	0,29	3685	280	164	1934	207,4	7,8
Témoin (NPK)	5,9	3,8	0,40	101	2,5	0,24	3769	209	180	1632	75,5	5,8
Combo (2,0 FS + NK)	6,0	3,8	0,39	112	2,4	0,28	3746	191	137	1754	104,3	5,3

[†] Les valeurs présentées sont les moyennes ajustées au modèle statistique.

[‡] Degré de saturation en P du sol.

Tableau 40. Analyses statistiques de l'impact de l'ajout de FSLP_c comme engrais azoté au sol sur les paramètres agronomiques (b.s.) du sol à la récolte, étés 2007 et 2008.

Sources de variation	pH	MO		C _{eau}	P _{eau}	N _{hydro}	N _{tot}	Éléments Mehlich-3				
		Total	Labile					P	K	Ca	Mg	DSP [‡]
2007												
Traitements [†]	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns	*	ns	ns	*	**
Linéaire	-	-	-	-	ns	-	-	ns	-	-	*	ns
Quadratique	-	-	-	-	ns	-	-	ns	-	-	ns	ns
FSLP _c vs NPK	-	-	-	-	**	-	-	**	-	-	**	**
FSLP _c vs OPK	-	-	-	-	ns	-	-	ns	-	-	*	ns
0 FS vs NPK [§]	-	-	-	-	ns	-	-	ns	-	-	ns	ns
70 % FS vs NPK	-	-	-	-	*	-	-	*	-	-	**	**
100 % FS vs NPK	-	-	-	-	(0,1079)	-	-	(0,0923)	-	-	ns	*
130 % FS vs NPK	-	-	-	-	**	-	-	**	-	-	**	**
Combo vs NPK	-	-	-	-	ns	-	-	ns	-	-	ns	ns
2008												
Traitements	*	ns	ns	*	**	*	ns	*	ns	ns	***	*
Linéaire	ns	-	-	ns	**	ns	-	*	-	-	***	*
Quadratique	ns	-	-	ns	ns	ns	-	ns	-	-	ns	ns
FSLP _c vs NPK	**	-	-	*	**	**	-	*	-	-	***	*
FSLP _c vs OPK	ns	-	-	ns	*	ns	-	*	-	-	***	*
0 FS vs NPK	ns	-	-	ns	ns	*	-	ns	-	-	ns	ns
70 % FS vs NPK	*	-	-	ns	ns	ns	-	ns	-	-	**	ns
100 % FS vs NPK	*	-	-	*	**	**	-	*	-	-	***	*
130 % FS vs NPK	**	-	-	**	**	**	-	*	-	-	***	*
Combo vs NPK	ns	-	-	ns	ns	(0,0679)	-	ns	-	-	ns	ns

[†] Niveau de signification de l'analyse de variance : *, **, ***, ns indiquent significatif à $P \leq 0,05, 0,01, 0,001$, et non significatif, respectivement.

[‡] Degré de saturation en P du sol.

[§] Comparaison des moyennes par la différence des moindres carrés. La dose de FS est exprimée en pourcentage d'équivalent minéral tel qu'estimé *a priori*.

En regard de ces effets sur le P, il faut toutefois considérer que les doses appliquées dans l'essai N sont excessivement élevées par rapport aux besoins en P des cultures, puisque celles-ci ont été choisies afin de combler les besoins en N. Ceci était un pré requis essentiel au calcul du CE du N de la FSLP_c, mais ne représente en aucun cas une utilisation adéquate de la FSLP_c dû à son rapport N/P très élevé. En effet, les apports de 5 à 12 t ha⁻¹ de FSLP_c apportaient au sol de 200 à 360 kg P ha⁻¹, ce qui est excessif. D'ailleurs, dans l'essai P, pour lequel les doses sont calculées pour assurer les besoins en P de la pomme de terre, aucune hausse significative des contenus en P_{M3}, P_{eau} ou du DSP n'a été mesurée (tableaux 41 et 42). Le très bon prélèvement en P des plants a certainement contribué à prévenir ces enrichissements (voir prélèvements totaux et CE finaux, tableau 50). De plus, les résultats pour le traitement Combo démontrent bien que lorsque les quantités de FSLP_c respectent la prescription du REA (MDDEP 2010a), aucune différence significative n'est mesurée comparativement au sol témoin NPK.

Tableau 41. Impact de l'ajout de FSLP_c comme engrais phosphaté au sol sur les paramètres agronomiques (b.s.) du sol à la récolte, étés 2007 et 2008.

Traitements [†]	pH	---- MO ----		C _{eau}	P _{eau}	N _{hydro} (260nm)	N _{tot}	----- Éléments Mehlich-3 -----				
		total	labile					P	K	Ca	Mg	DSP [‡]
		----- (%) -----		--- (mg kg ⁻¹) ---		absorbance		----- kg ha ⁻¹ -----				
2007												
0 FS + NK	6,0	4,2	0,42	158	3,0	0,343	3886	176	197	1915	82,8	5,1
1,5 FS + NK	5,9	3,9	0,40	153	3,5	0,344	3578	199	198	1695	88,5	5,6
2,5 FS + NK	6,0	3,9	0,39	155	3,5	0,365	3830	194	178	1868	104,2	5,4
3,5 FS + NK	6,0	4,0	0,43	154	3,8	0,351	3914	207	229	1889	100,0	6,0
Témoin (NPK)	6,0	3,9	0,40	152	2,1	0,337	3584	171	220	1742	71,0	4,9
Combo (2,75 FS + NK)	5,9	4,0	0,37	145	2,0	0,361	3668	162	186	1855	95,2	4,5
2008												
0 FS + NK	6,0	4,1	0,44	107	2,4	0,265	4088	195	173	1688	99,8	5,4
1,25 FS + NK	6,0	3,8	0,41	107	2,7	0,275	3752	213	189	1642	106,6	5,8
1,75 FS + NK	6,2	4,2	0,41	123	3,5	0,283	4138	213	172	1912	128,7	5,9
2,5 FS + NK	6,1	3,6	0,41	114	3,6	0,256	3595	252	166	1822	117,7	7,1
Témoin (NPK)	5,9	3,8	0,40	101	2,4	0,265	3769	209	180	1632	75,5	5,8
Combo (2,0 FS + NK)	6,0	3,8	0,39	112	2,4	0,275	3746	191	137	1754	104,3	5,3

[†] Les valeurs présentées sont les moyennes ajustées au modèle statistique.

[‡] Degré de saturation en P du sol.

Pour ce qui est de la MO des sols, ni le contenu en MO totale, ni celui en MO labile, n'ont été augmentés. Ainsi, dans le cadre d'une valorisation de la FSLP_c en fonction des doses prescrites par le REA, celle-ci ne devrait pas être utilisée dans une optique d'enrichissement du sol en MO. Même aux doses utilisées dans l'essai N, aucun accroissement significatif des contenus en MO totale et labile n'a été mesuré, à aucune des années, malgré le fait qu'au taux d'application de 12 t ha⁻¹ de FSLP_c, 2,2 t de C_{tot} (4,4 t de MO totale) étaient apportées au sol en moyenne. Ces résultats vont dans le même sens que ceux de Hernandez et coll. (2007), qui rapportent que des apports successifs pendant 5 ans de 150 m³ an⁻¹ de lisier de porcs n'ont pas permis de hausser le contenu en C_{tot} du sol, bien que l'application ait été faite sur une culture d'orge favorable à la conservation du C du sol. Ceci concorde avec le fait que le lisier de porcs est reconnu pour être pauvre en matières fibreuses plus grossières et plus résistantes à la dégradation dans le temps, mais qu'il est riche en composés carbonés facilement minéralisables fournissant une grande source d'énergie pour les microorganismes du sol (Chantigny et Angers 2000). Conformément à cette information, seul un accroissement du C_{eau} a été mesuré en 2008, dans les sols ayant reçu les doses intermédiaire et maximale de FSLP_c. Si à première vue ce constat peut paraître négatif, il révèle en fait que la très grande majorité du C apporté lors de l'application de FSLP_c est en réalité très facilement minéralisable, tel que le démontrent les résultats obtenus sur l'évolution des pools labiles de C, N et P (section 3.3.1), ainsi que sur l'activité biologique des sols (section 3.3.2). En moyenne, une tonne fraîche de FSLP_c apporte donc au sol 183 kg de C disponible pour les microorganismes. Ceci représente une source notable d'énergie facilement accessible et sous-tend l'hypothèse que l'apport de FSLP_c favorise la fertilité générale des sols par une stimulation de ces processus biologiques. D'un point de vue d'amendement des sols en MO, ceci est un désavantage. Par contre, d'un point de vue

fertilisation, il s'agit d'une qualité très positive. La FSLP_c devrait donc d'abord être considérée comme un excellent engrais organique, plutôt que comme un amendement organique. Cette affirmation sera d'ailleurs appuyée ultérieurement par les analyses d'ISB, dont il est question à la section 3.7.

Tableau 42. Analyses statistiques de l'impact de l'ajout de FSLP_c comme engrais phosphaté au sol sur les paramètres agronomiques (b.s.) du sol à la récolte, étés 2007 et 2008.

Sources de variation	pH	MO		C _{eau}	P _{eau}	N _{hydro}	N _{tot}	Éléments Mehlich-3				
		Total	Labile					P	K	Ca	Mg	DSP [‡]
2007												
Traitements [†]	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Linéaire	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Quadratique	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
FSLP _c vs NPK	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
FSLP _c vs NOK	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0 FS vs NPK [‡]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
60 % FS vs NPK	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
90 % FS vs NPK	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
120 % FS vs NPK	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Combo vs NPK	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2008												
Traitements	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns
Linéaire	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	ns	-
Quadratique	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	ns	-
FSLP _c vs NPK	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	**	-
FSLP _c vs NOK	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	ns	-
0 FS vs NPK [§]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	ns	-
60 % FS vs NPK	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	*	-
90 % FS vs NPK	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	**	-
120 % FS vs NPK	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	**	-
Combo vs NPK	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	ns	-

[†] Niveau de signification de l'analyse de variance : *, **, ***, ns indiquent significatif à $P \leq 0,05, 0,01, 0,001$, et non significatif, respectivement.

[‡] Degré de saturation en P du sol.

[§] Comparaison des moyennes par la différence des moindres carrés. La dose de FS est exprimée en pourcentage d'équivalent minéral tel qu'estimé *a priori*.

Dans cet ordre d'idée, plusieurs études menées au Québec ont démontré que l'impact qu'aura l'addition d'un AEOs au sol dépend principalement de son contenu total en C et du stade de maturation du matériel (Lalande et coll. 1998, N'Dayegamiye et coll. 2005). Ainsi, le fait d'avoir conditionné la FSLP_c par assèchement (aération forcée) suite à sa centrifugation, afin de prévenir le compostage, a fait en sorte que la FSLP_c a conservé des propriétés fertilisantes et n'a pas acquis de propriétés des amendements puisque le matériel n'a que peu mûri. Ainsi, la FSLP_c, qui a conservé en bonne partie son C labile et dont la minéralisation du N_o a été

minimisée, apparaît comme un matériel peu mature qui s'est conséquemment comporté comme un engrais et non un amendement. Le processus de conditionnement par assèchement semble donc avoir été efficace à maintenir les qualités fertilisantes de la FSLP.

3.4.2 Contenus en ÉTMs, *E. coli* et nitrates résiduels du sol à la récolte

Parmi tous les ÉTMs mesurés dans le sol à la récolte, aucun n'a été augmenté après la saison de production lorsque la FSLP_c est utilisée comme engrais phosphaté, dans le respect du REA (MDDEP 2010a) (tableaux 45 et 46). Même aux doses utilisées dans l'essai N, seul un enrichissement en Zn a été mesuré (tableaux 43 et 44). En 2007, les doses de 6, 9 et 12 t ha⁻¹, qui apportaient 4,2, 6,3 et 8,4 kg Zn total ha⁻¹, ont enrichi le sol en Zn Mehlich-3 de 46 % en moyenne. En 2008, seules les deux plus grandes doses, de 7,5 et 10 t ha⁻¹, qui apportaient 7,3 et 9,8 kg Zn total ha⁻¹, ont enrichi le sol en moyenne de 58 % en Zn Mehlich-3. Moreno-Caselles et coll. (2005), qui ont appliqué au champ des doses de FSLP centrifugée apportant 6,4 et 9,6 kg Zn, rapportent également une hausse des teneurs en Zn du sol (Zn extrait au DTPA). Dans notre étude, l'enrichissement en Zn disponible du sol ne s'est cependant pas traduit par une hausse des teneurs en Zn des tubercules, à aucune des années, tel que rapporté précédemment à la section 3.2.4. De plus, selon les critères d'interprétation des teneurs en ÉTMs établis par Giroux et coll. (1992) et par Deschênes et coll. (2004) à partir des analyses du fond pédogéochimique de 76 séries de sol du Québec, les sols fertilisés avec la FSLP_c sont encore très en dessous du critère de richesse maximale de 9 mg Cu et de 14 mg Zn Mehlich-3 kg⁻¹. Bien évidemment, cette étude ne couvre que les effets de première année d'application. Des études à moyen et long terme seraient donc à envisager afin d'évaluer l'impact de la valorisation de la FSLP_c sur une base régulière, pendant une longue période, sur l'évolution des teneurs en ÉTMs du sol. En effet, des essais menés dans la culture du maïs-grain et sur prairies ont démontré que 10 ans d'application de lisier de porcs entraînaient une augmentation importante du Cu et du Zn labiles (Mehlich-3) du sol, même si la teneur totale du sol n'augmentait pas sensiblement (Giroux et coll. 2004). Toutefois, l'apport de FSLP_c ne produirait pas nécessairement le même impact puisqu'elle présente des proportions d'éléments beaucoup plus intéressantes que le lisier pour fertiliser les cultures sur la base de leurs besoins en P. En effet, bien que la FSLP_c apporte plus de ÉTMs par tonne appliquée que le lisier, dans les faits, grâce à son ratio P_{tot}/ÉTMs, il est possible de combler les besoins en P tout en apportant beaucoup moins d'ÉTMs.

Les décomptes de *Escherichia coli*, souvent utilisés comme indicateur de contamination fécale pour décrire le comportement des entérobactéries après l'épandage de fumier/lisier (Côté et coll. 2006), ne présentent aucune augmentation dans le sol suite à l'apport de FSLP_c, pour toutes les doses et lors des deux années à l'étude. Un tel résultat était attendu puisque les entérobactéries contenues dans le lisier de porcs se retrouvent dans des conditions qui leur sont défavorables suite à l'épandage. Habituellement, suite à leur introduction dans les sols agricoles, les populations d'entérobactéries suivent une décroissance exponentielle. Elles sont entre autres la proie des protozoaires, présents naturellement dans les sols. De plus, elles sont peu compétitives face aux microorganismes du sol pour se procurer des éléments nutritifs. Les entérobactéries sont donc moins persistantes dans les sols agricoles possédant une bonne activité microbiologique. Sur ce point, l'impact très significatif de la FSLP_c sur la hausse du taux d'activité biologique des sols a certainement contribué aux résultats obtenus. Ainsi, considérant (1) le taux de réduction efficace des populations de *E.coli* lors du conditionnement de la FSLP_c, (2) leur concentration

beaucoup plus faible que dans un lisier de porcs non traité (section 3.1.3), (3) leur faible résistance une fois au sol et (4) l'absence complète d'accroissement de leur nombre dans les sols fertilisés même avec les plus fortes doses de FSLP_c, les risques pour la santé humaine sont faibles.

Enfin, le maintien des teneurs en nitrates au même niveau que celles dans les sols non fertilisés et les sols témoins NPK, à chacune des années, suggère que le risque de pollution diffuse par le lessivage des nitrates résiduels à l'automne n'est pas plus présent que lors de l'utilisation d'engrais minéraux. Ce résultat est très positif puisque certains AEOs, dont la minéralisation du N_o est plus difficile et tardive, conduisent à un relâchement massif des nitrates au-delà de la période de pointe de prélèvement par la culture, générant ainsi une accumulation de nitrates résiduels. Cet azote résiduel, potentiellement lessivable à l'automne et au printemps suivant, représente un risque environnemental. Par contre, dans les cas où la minéralisation du N_o est rapide, comme dans le cas de la FSLP_c, le recaptage des nitrates par les plantes avant leur lessivage est favorisé, puisque ceux-ci sont libérés au bon moment et que la balance de N sous forme organique n'est pas lessivable. Ainsi, la minéralisation rapide du N_o de la FSLP_c, combinée à l'excellent prélèvement en N des plants en cours de saison, a contribué à prévenir l'accumulation des nitrates résiduels en période post-récolte.

Tableau 43. Impact de l'ajout de FSLP_c comme engrais azoté au sol sur les contenus (b.s.) en ÉTMs, *E. coli* et nitrates résiduels du sol à la récolte, étés 2007 et 2008.

Traitements [†]	Éléments Mehlich-3					N-NO ₃	<i>E. coli</i> (NPP g ⁻¹)
	Al	Cu	Fe	Mn	Zn		
	(mg kg ⁻¹)						
2007							
0 FS + PK	1582	1,11	133	6,13	1,82	4,35	18
6 FS + PK	1546	1,14	139	7,76	2,58	5,63	29
9 FS + PK	1551	1,12	135	8,06	2,35	6,62	23
12 FS + PK	1578	1,08	137	7,28	2,69	6,16	41
Témoin (NPK)	1578	1,08	130	5,59	1,72	6,05	26
Combo (2,75 FS + NK)	1595	1,21	128	5,81	1,83	8,01	19
2008							
0 FS + PK	1616	1,20	144	6,00	1,91	2,04	91
5 FS + PK	1585	1,20	139	6,23	2,29	2,82	99
7,5 FS + PK	1615	1,30	134	6,84	3,16	3,74	57
10 FS + PK	1603	1,24	132	6,62	2,85	3,53	90
Témoin (NPK)	1619	1,20	142	6,73	1,90	3,15	110
Combo (2,0 FS + NK)	1618	1,14	132	5,79	1,80	5,51	109

[†] Les valeurs présentées sont les moyennes ajustées au modèle statistique.

Tableau 44. Analyses statistiques de l'impact de l'ajout de FSLP_c comme engrais azoté au sol sur les contenus (b.s.) en ÉTMs, *E. coli* et nitrates résiduels du sol à la récolte, étés 2007 et 2008.

Sources de variation	2007							2008						
	Al	Cu	Fe	Mn	Zn	N-NO ₃	<i>E. coli</i>	Al	Cu	Fe	Mn	Zn	N-NO ₃	<i>E. coli</i>
Traitements [†]	ns	ns	ns	ns	***	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**	ns	ns
Linéaire	-	-	-	-	**	-	-	-	-	-	-	**	-	-
Quadratique	-	-	-	-	ns	-	-	-	-	-	-	ns	-	-
FSLP _c vs NPK	-	-	-	-	***	-	-	-	-	-	-	**	-	-
FSLP _c vs 0PK	-	-	-	-	***	-	-	-	-	-	-	**	-	-
0 FS vs NPK [‡]	-	-	-	-	ns	-	-	-	-	-	-	ns	-	-
70 % FS vs NPK	-	-	-	-	**	-	-	-	-	-	-	ns	-	-
100 % FS vs NPK	-	-	-	-	*	-	-	-	-	-	-	***	-	-
130 % FS vs NPK	-	-	-	-	***	-	-	-	-	-	-	**	-	-
Combo vs NPK	-	-	-	-	ns	-	-	-	-	-	-	ns	-	-

[†] Niveau de signification de l'analyse de variance : *, **, ***, ns indiquent significatif à $P \leq 0,05, 0,01, 0,001$, et non significatif, respectivement.
[‡] Comparaison des moyennes par la différence des moindres carrés. La dose de FS est exprimée en pourcentage d'équivalent minéral tel qu'estimé *a priori*.

Tableau 45. Impact de l'ajout de FSLP_c comme engrais phosphaté au sol sur les contenus (b.s.) en ÉTMs, *E. coli* et nitrates résiduels du sol à la récolte, étés 2007 et 2008.

Traitements [†]	Éléments Mehlich-3					N-NO ₃	<i>E. coli</i> (NPP g ⁻¹)
	Al	Cu	Fe	Mn	Zn		
----- (mg kg ⁻¹) -----							
2007							
0 FS + NK	1578	1,16	132	7,00	1,90	7,01	85
1,5 FS + NK	1604	1,08	139	6,66	1,92	6,04	33
2,5 FS + NK	1601	1,14	130	6,25	2,01	6,75	18
3,5 FS + NK	1553	1,17	139	7,46	2,21	7,76	108
Témoin (NPK)	1578	1,08	130	5,59	1,72	6,05	26
Combo (2,75 FS + NK)	1595	1,21	128	5,81	1,83	8,01	19
2008							
0 FS + NK	1607	1,11	132	5,85	1,94	2,72	107
1,25 FS + NK	1628	1,11	137	5,94	1,92	3,33	84
1,75 FS + NK	1614	1,14	127	5,39	2,05	3,32	115
2,5 FS + NK	1580	1,20	140	7,16	2,26	3,98	112
Témoin (NPK)	1619	1,20	142	6,79	1,90	3,15	110
Combo (2,0 FS + NK)	1618	1,14	132	5,73	1,80	3,55	109

[†] Les valeurs présentées sont les moyennes ajustées au modèle statistique.

Tableau 46. Analyses statistiques de l'impact de l'ajout de FSLP_c comme engrais phosphaté au sol sur les contenus (b.s.) en ÉTMs, *E. coli* et nitrates résiduels du sol à la récolte, étés 2007 et 2008.

Sources de variation	2007							2008						
	Al	Cu	Fe	Mn	Zn	N-NO ₃	<i>E. coli</i>	Al	Cu	Fe	Mn	Zn	N-NO ₃	<i>E. coli</i>
Traitements [†]	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Linéaire	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Quadratique	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
FSLP _c vs NPK	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
FSLP _c vs NOK	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0 FS vs NPK [‡]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
60 % FS vs NPK	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
90 % FS vs NPK	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
120 % FS vs NPK	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Combo vs NPK	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

[†] Niveau de signification de l'analyse de variance : *, **, ***, ns indiquent significatif à $P \leq 0,05, 0,01, 0,001$, et non significatif, respectivement.

[‡] Comparaison des moyennes par la différence des moindres carrés. La dose de FS est exprimée en pourcentage d'équivalent minéral tel qu'estimé *a priori*.

3.5 Évaluer les coefficients d'efficacité fertilisante (CE) de N et P de la FSLP_c afin de permettre le calcul des doses à épandre en fonction des besoins des plantes dans le but de réduire l'emploi des engrais de synthèse et de proposer une voie économiquement rentable et durable de valorisation des surplus de lisier

Pour attribuer une valeur économique en tant qu'engrais à un AEO, il est indispensable de comparer son efficacité fertilisante à celle des engrais minéraux commerciaux dont l'efficacité (CE) est toujours considérée par défaut comme étant de 100 %, indépendamment de leur taux d'utilisation (CUA). Ainsi, afin de s'assurer que la mesure d'efficacité de l'AEO testé sera valide, l'utilisation de l'engrais commercial qui sert de référence doit impérativement se situer dans l'intervalle des valeurs usuelles. Dans notre étude, en 2007 et 2008, l'engrais commercial azoté a présenté des taux d'utilisation (CUA) de 59 et 60 %, respectivement (tableau 47). Dans le cas de l'engrais commercial phosphaté, les taux d'utilisation étaient de 3 et 7 % en 2007 et 2008, respectivement (tableau 50). Ces CUA, tant pour le N que le P, sont tout à fait dans l'intervalle des valeurs publiées. En moyenne, au Québec, l'utilisation du N des engrais par les cultures est en effet de l'ordre de 50 % lors de l'année d'application (N'Dayegamiye et Seydoux 2008). Pour la culture de la pomme de terre (feuillage et tubercules), le CUA est rarement de plus de 60 % et peut s'abaisser dans les 30 % lorsque les conditions climatiques ou de sol sont défavorables (Tran et coll. 1992, Gasser et Laverdière 2000, CRAAQ 2003). Diverses études réalisées dans cette culture, dans la même région et durant les mêmes années que la présente étude, rapportent aussi des CUA du N d'un même ordre de grandeur (Boivin et Landry 2009, Landry et Boivin 2010). Pour ce qui est du P, son faible taux d'utilisation, lié à sa forte capacité de fixation dans les sols, fait en sorte qu'un taux moyen d'utilisation de moins de 10 % des quantités appliquées est accepté comme CUA usuel. Ainsi, les taux d'utilisation mesurés lors de la réalisation de ce projet confirment que les conditions climatiques et de sol qui ont prévalu durant les deux saisons d'étude ont permis aux engrais minéraux d'exprimer un taux habituel d'utilisation.

Par ailleurs, lorsque l'on procède à l'établissement de CUA dans le but de calculer les CE du N ou P contenus dans divers AEOs, il est primordial de tester plusieurs doses de ces AEOs. En effet, bien qu'il soit possible d'estimer *a priori* un certain CE pour les éléments contenus dans ces AEOs, il est hasardeux de s'en tenir à une seule dose à tester au champ car les CE réels peuvent en fait se révéler différents des CE estimés. La principale difficulté réside donc dans le choix des doses à tester puisqu'une dose trop forte ou trop faible sous-estimera le CE réel. Ceci tient au fait que le CUA dépend de la quantité de l'élément effectivement prélevée par la culture en fonction de la quantité totale apportée de cet élément. Ainsi, si une dose dépassant largement les besoins de la plante est apportée, la plante ne prélèvera pas davantage de l'élément que ce qui est prescrit pour ses besoins. Le ratio prélevé/apporté sera donc plus faible. Inversement, si trop peu d'éléments sont apportés, la plante prélèvera le peu qu'il y a, mais si sa croissance est limitée par le manque d'éléments disponibles, l'efficacité de l'élément testé sera faussement diminuée. Conséquemment, l'idéal est de tester de quatre à cinq doses afin de s'assurer d'obtenir le CE le plus élevé entre deux CE plus faibles. Cependant, un tel nombre de traitements est coûteux et la majorité des études sur le sujet utilise donc moins de quatre doses.

Afin d'être totalement comparable, il est également préférable que les CE obtenus pour des AEOs d'origines différentes aient été établis pour une même culture et dans un même type de sol. Le type de culture influencera effectivement le CE puisqu'une plante ayant des besoins en N ou P plus grands prélèvera aussi plus de cet élément. Certaines cultures sont également plus efficaces à prélever les nutriments du sol, dû par exemple à un système racinaire plus développé. De plus, les cultures dont la croissance active se déroule sur une plus longue période pourront prélever davantage d'un nutriment si celui-ci doit d'abord être minéralisé, ce qui échelonne sa disponibilité dans le temps. Enfin, les sols sableux, dans lesquels la minéralisation de la MO est plus intense, favoriseront l'efficacité des formes organiques de N et P. Cependant, devant le nombre restreint de cultures et de types de sol étudiés dans les études publiées sur le sujet, il devient difficile de respecter à la lettre ces pré requis de comparaison. À notre connaissance, aucune autre étude établissant des CE du N et P de la FSLP traitée n'a été publiée. Nous considérons toutefois que la comparaison des CE, obtenus avec des cultures aux besoins en N et P similaires à ceux de la pomme de terre et sur des sols reconnus pour permettre un bon taux de minéralisation de la MO, demeure valable. Par ailleurs, à défaut de données générées dans des conditions identiques, la consultation des données du Guide de référence en fertilisation du Québec (CRAAQ 2003) pour des sols de textures similaires (sable à loam sableux) est largement acceptée par les agronomes et les scientifiques oeuvrant dans ce secteur de recherche. Enfin, lors des essais, il était primordial de viser une culture et un type de sol pour lesquels l'utilisation de l'AEO testé est envisagée. C'est pourquoi la présente étude a été réalisée en sol sableux, sensible à la déperdition de MO, et avec la pomme de terre, exigeante en N et P, car la FSLP_c est riche en ces deux éléments.

3.5.1 Efficacité fertilisante de l'azote de la FSLP_c

À chacune des années, une hausse linéaire hautement significative ($P < 0,001$) des prélèvements en N a été mesurée suite à l'accroissement des doses de FSLP_c. Ainsi, des prélèvements totaux en N allant de 133 à 187 kg N ha⁻¹ et de 103 à 166 kg N ha⁻¹ ont été mesurés, en 2007 et 2008, respectivement. Ces prélèvements se situent au niveau attendu. En effet, selon la valeur de référence (CRAAQ 2003) en prélèvement total en N pour la pomme de terre (fanés et

tubercules), des prélèvements totaux avoisinant les 167 et 137 kg N ha⁻¹ étaient attendus en 2007 et 2008, respectivement. Les prélèvements totaux mesurés ont été utilisés pour calculer les CE du N de la FSLP_c présentés au tableau 47. Les calculs indiquent qu'en 2007, le CE établi *a priori* selon la caractérisation biochimique, servant à déterminer les doses de FSLP_c à tester, était en-deçà de l'efficacité réelle du N de la FSLP_c. Les doses de FSLP_c testées étaient donc un peu trop élevées. Le CE le plus élevé obtenu lors des essais de champ n'est donc pas borné de CE plus bas, ce qui aurait indiqué que la dose n'était ni trop grande, ni trop faible (tableau 47). La comparaison avec les CE de 2008 démontre tout de même que l'éventail de doses utilisées était près de l'optimum. En effet, en 2008, le meilleur CE du N, de 64 %, a été généré par la dose intermédiaire de 7,5 t b.h. FSLP_c ha⁻¹. En 2007, le plus haut CE, généré par la plus petite dose de 6 t FSLP_c ha⁻¹, était également de 64 %. L'usage d'une dose de 5 t FSLP_c ha⁻¹ en 2007 aurait donc peut-être donné un CE plus faible, identifiant le CE de 64 % comme étant le CE maximal. Un CE du N de la FSLP_c de 64 % est donc retenu suite aux deux années d'expérimentation.

Selon les valeurs références (CRAAQ 2003) pour les sables à loam sableux, l'efficacité fertilisante du N de la FSLP_c est supérieure à celle des fumiers, lisiers et purins de bovins. Fait surprenant, elle serait même proche du CE de 70 % des lisiers de porcs et moindre de seulement 11 points de pourcentage du CE de 75 % des fumiers de volailles, reconnus pour leur grande efficacité azotée, ayant permis la mise en marché de ces fumiers sous forme d'engrais organiques granulés. De plus, une revue exhaustive des publications établissant des CE du N d'AEOs en conditions culturales québécoises, sur des sols sableux à loameux, démontre que l'efficacité fertilisante du N de la FSLP_c se positionne très bien, dépassant tous les CE rapportés, excepté ceux obtenus de la valorisation directe du lisier de porcs (tableau 49). Le N des lisiers est effectivement reconnu pour sa grande efficacité, de près de 100 %, puisque le N y est sous forme minérale N-NH₄ très efficace. L'atteinte de CE de 64 % par la FSLP_c est donc notable puisque 95 % du N y est sous forme organique. Le CE du N de la FSLP_c dépasse aussi largement celui des boues mixtes de papetières et des fumiers de bovins obtenu dans la culture de la pomme de terre. Il surpasse également celui des composts de résidus ménagers, établi en sable loameux avec le maïs-grain, une culture très exigeante en N et performante dans son prélèvement. Le fait que la MO des lisiers de porcs est très fermentescible, c'est-à-dire facilement dégradé par les microorganismes présents dans les sols, contrairement à celle des fumiers qui est moyennement fermentescible, a certainement contribué à la plus grande efficacité du N de la FSLP_c.

Outre le grand degré de labilité apparente du N_o contenu dans la FSLP_c, l'efficacité du N de la FSLP_c pourrait aussi être en partie liée aux apports d'éléments mineurs. De plus, l'impact très significatif de son utilisation sur l'activité biologique des sols a certainement contribué de façon indirecte à l'atteinte des CE mesurés. En effet, la santé des sols est une composante déterminante de leur productivité. Toute amélioration des propriétés physiques et biologiques des sols, qui crée des conditions propices à la croissance optimale des cultures et à l'absorption efficace des nutriments, est bénéfique aux rendements des cultures (Chantigny et coll. 1999, Abdallahi et N'Dayegamiye 2000, Simard et coll. 2000). Par exemple, il a été rapporté dans plusieurs études que l'application d'AEOs, tels les fumiers solides de bovins, les boues mixtes de papetières ou les engrais verts, hausse significativement les activités biologiques et enzymatiques des sols (Abdallahi et N'Dayegamiye 2000, Gagnon et coll. 2000, Simard 2001, Lalande et coll. 2003, N'Dayegamiye et coll. 2004a, N'Dayegamiye 2006), générant un effet bénéfique sur les productions nommé « l'effet non azoté » ou « effet indirect sur la productivité » (Magdoff et Amadon 1980). Cependant, puisque la MO de la FSLP_c est très fermentescible, son action sur les

propriétés du sol sera temporaire et des applications répétées seront probablement nécessaires pour maintenir ses effets bénéfiques. De plus, il semble qu'une quantité minimale doive être appliquée, comme le démontre le traitement Combo, utilisant une faible dose de FSLP_c, et pour lequel aucun effet synergétique n'a été généré entre le N_{min} et la FSLP_c.

Tableau 47. Impact de l'ajout de FSLP_c comme engrais azoté au sol sur les prélèvements totaux en N (b.s.) et sur l'efficacité fertilisante du N de la FSLP_c, étés 2007 et 2008.

Traitements [†]	Prélèvements totaux N ----- (kg N ha ⁻¹) -----	CUA [‡]	CE [§]
2007			
0 FS + PK	64		
6 FS + PK	133	0,38	0,64
9 FS + PK	155	0,33	0,57
12 FS + PK	187	0,34	0,57
Témoin (NPK)	152	0,59	
Combo (2,75 FS + NK)	155		
2008			
0 FS + PK	33		
5 FS + PK	103	0,37	0,62
7,5 FS + PK	141	0,38	0,64
10 FS + PK	166	0,35	0,59
Témoin (NPK)	123	0,60	
Combo (2,0 FS + NK)	141		

[†] Les valeurs présentées pour les prélèvements totaux sont les moyennes ajustées au modèle statistique.

[‡] CUA : coefficient d'utilisation apparente de l'azote.

[§] CE : coefficient d'efficacité fertilisante de l'azote de la FSLP_c.

Tableau 48. Analyses statistiques de l'impact de l'ajout de FSLP_c comme engrais azoté au sol sur les prélèvements totaux en N (b.s.), étés 2007 et 2008.

Sources de variation	----- 2007 -----	----- 2008 -----
	Prélèvements totaux N	Prélèvements totaux N
Traitements [†]	***	***
Linéaire	***	***
Quadratique	ns	ns
FSLP _c vs NPK	ns	ns
FSLP _c vs OPK	***	***
0 FS vs NPK [‡]	***	***
70 % FS vs NPK	*	ns
100 % FS vs NPK	ns	ns
130 % FS vs NPK	**	*
Combo vs NPK	ns	ns

[†] Niveau de signification de l'analyse de variance : *, **, ***, ns indiquent significatif à $P \leq 0,05, 0,01, 0,001$, et non significatif, respectivement.

[‡] Comparaison des moyennes par la différence des moindres carrés. La dose de FS est exprimée en pourcentage d'équivalent minéral tel qu'estimé *a priori*.

Tableau 49. Coefficient d'utilisation et d'efficacité fertilisante du N de divers produits organiques.

AEOs ¹	C/N	Type de sol	Culture	CUA ² (%)		CE ⁴
				EM ³	AEOs	--- (%) ---
Boues mixtes de papetières ⁵	11	Loam	Pomme de terre	54	26	49
Boues mixtes de papetières ⁵	21	Loam	Pomme de terre	54	23	43
Fumier de bovins de boucherie ⁵	20	Loam	Pomme de terre	54	20	36
Fumier composté de bovins ⁵	20	Loam	Pomme de terre	54	13	25
Boues mixtes de papetières ⁶	31	Loam	Maïs ensilage	51	22	44
Boues mixtes de papetières ⁶	30	Loam	Maïs ensilage	51	14	28
Fumier de bovins de boucherie ⁶	23	Loam	Maïs ensilage	51	12	24
Fumier de bovins laitiers ⁶	28	Loam	Maïs ensilage	51	21	41
Engrais verts, millet ⁷	29	Loam limoneux	Blé	43	50	19
Engrais verts, sarrasin ⁷	22	Loam limoneux	Blé	43	52	25
Engrais verts, colza ⁷	18	Loam limoneux	Blé	43	45	36
Engrais verts, moutarde blanche ⁷	19	Loam limoneux	Blé	43	52	29
Lisier de porcs ⁸	12	Loam limoneux	Canola	54	36	67
Lisier de porcs ⁸	13	Loam limoneux	Canola	72	60	83
Lisier de porcs ⁸	13	Loam limoneux	Canola	42	37	89
Boues mixtes de papetières ⁹	15	Loam limoneux	Maïs-grain	49	19	13
Boues mixtes de papetières ⁹	13	Loam limoneux	Maïs-grain	30	14	7
Boues mixtes de papetières ⁹	14	Loam limoneux	Maïs-grain	48	22	14
Boues mixtes de papetières ¹⁰	17	Loam limono-argileux	Maïs-grain	49	21	42
Boues mixtes de papetières ¹⁰	18	Loam limoneux	Maïs-grain	49	19	38
Compost de résidus ménagers ¹¹		Sable loameux	Maïs-grain	33	7	21
Valeurs références¹²						
Fumier de bovins	-	Sable à loam sableux	-	-	-	55
	-	autres	-	-	-	45
Lisier et purin de bovins	-	Sable à loam sableux	-	-	-	60
	-	autres	-	-	-	50
Lisier de porcs	-	Sable à loam sableux	-	-	-	70
	-	autres	-	-	-	60
Fumier de volailles	-	Sable à loam sableux	-	-	-	75
	-	autres	-	-	-	65
Lisier de volailles	-	Sable à loam sableux	-	-	-	85
	-	autres	-	-	-	75

¹ AEO : amendement et engrais organique.² CUA : coefficient d'utilisation apparente.³ EM : engrais minéral.⁴ CE : coefficient d'efficacité.⁵ Adapté de Giroux et coll. 2007.⁶ Adapté de N'Dayegamiye et coll. (2003a).⁷ Adapté de N'Dayegamiye et Tran (2002).⁸ Adapté de Giroux et coll. (2000a).⁹ Adapté de N'Dayegamiye et coll. (2003b).¹⁰ Adapté de N'Dayegamiye et coll. (2001).¹¹ Adapté de N'Dayegamiye et coll. (2005).¹² Coefficients moyens d'efficacité de 1^{ère} année des éléments fertilisants des engrais de ferme (CRAAQ 2003).

3.5.2 Efficacité fertilisante du phosphore de la FSLP_c

À chacune des années, une hausse linéaire hautement significative ($P < 0,001$) des prélèvements en P a été mesurée suite à l'accroissement des doses de FSLP_c. Ainsi, des prélèvements totaux en P allant de 13 à 20 kg P ha⁻¹ et de 11 à 17 kg P ha⁻¹ ont été mesurés, en 2007 et 2008, respectivement. Ces prélèvements se situent au niveau attendu. En effet, selon la valeur de référence (CRAAQ 2003) de prélèvement total en P (fanés et tubercules), des prélèvements totaux avoisinant les 22 et 18 kg P ha⁻¹ étaient attendus en 2007 et 2008, respectivement. Dans tous les cas, les prélèvements totaux en P ont été plus grands suite à

l'apport de FSLP_c, comparativement au P_{min} (tableau 50). Ainsi, à chacune des années, l'efficacité du P de la FSLP_c dépasse largement celle du P_{min} avec des valeurs excédant parfois les 300 %. Ces valeurs sont plus élevées que l'ensemble des CE de référence rapportés dans le Guide de référence en fertilisation du Québec (CRAAQ 2003). Toutefois, de telles efficacités, dépassant les 100 %, sont également rapportées par d'autres auteurs ayant testé différents AEOs en conditions de productions commerciales (tableau 52). Entre autres, une efficacité de plus de 100 % est rapportée pour le P des boues de papetières qui est aussi principalement sous forme inorganique (Gagnon et coll. 2004). De plus, N'Dayegamiye (1998), qui a estimé l'efficacité du P des biosolides mixtes de papetières dans la culture du maïs-grain, rapporte une efficacité plus grande du P des boues que de l'engrais minéral, variant entre 115 à 170 %. Nos résultats sont aussi corroborés par les travaux de Baziramakenga (2003) effectués dans la culture du maïs-grain et démontrant que le P d'un compost de biosolides primaires de désencrage se comportait comme celui d'un engrais minéral phosphaté, mais avec une efficacité relative de plus de 100 %. Au final, dans le cadre de notre étude, un CE de 100 % est retenu pour le P de la FSLP_c.

Par ailleurs, contrairement à ce qui a été rapporté pour le N, l'utilisation simultanée de la FSLP_c et de l'engrais P_{min} a créé une synergie bénéfique à l'utilisation du P par la culture. Ainsi, les plants du traitement Combo ont prélevé significativement 25 % plus de P que ceux fertilisés au P_{min} (tableau 50). Ceci signifie que même dans le cas où la dose de FSLP_c pouvant être appliquée est limitée par le respect du REA (MDDEP 2010a), celle-ci est encore suffisante pour influencer à la hausse la nutrition en P. En 2007 et 2008, les doses de FSLP_c testées, similaires à celles employées dans les traitements Combo, ont d'ailleurs engendré des effets significatifs similaires. Cet effet positif est probablement supporté par la hausse de solubilité du P appliqué une fois au sol suite à l'apport de composés organiques contenus dans la FSLP_c, tel qu'expliqué à la section 3.3.1. Les hauts CE mesurés sont toutefois la preuve définitive que l'application de FSLP_c est un moyen particulièrement efficace de maintenir la disponibilité du P tout au long de la période de prélèvement par la culture. Une telle synergie a aussi été rapportée par Simard et coll. (1998) dans la culture du chou suite à l'application simultanée de compost de boues de papetières et de P_{min}. Lalande et coll. (2003) rapportent aussi une synergie entre un compost de biosolides de papetières et du lisier de porcs sur l'activité biologique et le rendement des cultures d'un sol sableux en production de pommes de terre.

Devant l'expression de cette synergie, de plus en plus de travaux portant sur l'élaboration et le développement d'engrais organo-minéraux (EOMs) sont mis sur pied. Certains EOMs faits de fumier déshydraté de porcs et d'engrais P_{min} ont d'ailleurs été testés au cours des dernières années (Provencher 2003, Khiari et Parent 2003, Claude et Giroux 2006) et l'ensemble des études consultées concluent que les EOMs granulés permettent une réduction des apports de P avec une amélioration de sa disponibilité. L'étude de Provencher (2003) utilisait spécifiquement une FSLP de lisier de porcs (LIOR 3,3-5,5-3,0; lisier bio-traité et déshydraté par DE.C Technologies) qu'elle comparait avec le phosphate mono-ammoniacal (MAP, 11-52-0) à l'échelle du champ dans la culture de la pomme de terre (régions de Portneuf, Lotbinière et Lanaudière). L'auteur rapporte que l'utilisation du LIOR a permis d'augmenter significativement l'efficacité des engrais phosphatés tout en ayant l'avantage supplémentaire d'avoir mené à l'obtention de rendements vendables significativement supérieurs à ceux obtenus suite à l'application du P_{min} seul. Ainsi, les résultats de la présente étude et de la littérature démontrent qu'il serait envisageable de réduire les apports d'engrais P_{min} sans diminution des rendements lorsqu'un EOM est utilisé. Cela aurait l'avantage de réduire les risques environnementaux associés à l'utilisation de quantités excessives

d'engrais P_{min}, en plus d'offrir un débouché intéressant pour les surplus de lisier de porcs au Québec.

Tableau 50. Impact de l'ajout de FSLP_c comme engrais phosphaté au sol sur les prélèvements totaux en P (b.s.) et sur l'efficacité fertilisante du P de la FSLP_c, étés 2007 et 2008.

Traitements [†]	Prélèvements totaux P ----- (kg P ha ⁻¹) -----	CUA [‡]	CE [§]
2007			
0 FS + NK	11,8		
1,5 FS + NK	13,3	0,034	1,37
2,5 FS + NK	17,9	0,082	3,25
3,5 FS + NK	19,9	0,078	3,11
Témoin (NPK)	13,4	0,025	
Combo (2,75 FS + NK)	16,9		
2008			
0 FS + NK	7,1		
1,25 FS + NK	11,5	0,087	1,27
1,75 FS + NK	13,6	0,092	1,34
2,5 FS + NK	17,4	0,102	1,49
Témoin (NPK)	11,6	0,069	
Combo (2,0 FS + NK)	14,5		

[†] Les valeurs présentées pour les prélèvements totaux sont les moyennes ajustées au modèle statistique.

[‡] CUA : coefficient d'utilisation apparente de l'azote.

[§] CE : coefficient d'efficacité fertilisante de l'azote de la FSLP_c.

Tableau 51. Analyses statistiques de l'impact de l'ajout de FSLP_c comme engrais phosphaté au sol sur les prélèvements totaux en P (b.s.), étés 2007 et 2008.

Sources de variation	----- 2007 -----	----- 2008 -----
	Prélèvements totaux P	Prélèvements totaux P
Traitements [†]	***	***
Linéaire	***	***
Quadratique	ns	ns
FSLP _c vs NPK	**	*
FSLP _c vs N0K	***	***
0 FS vs NPK [‡]	ns	**
60 % FS vs NPK	ns	ns
90 % FS vs NPK	**	(0,1377)
120 % FS vs NPK	***	***
Combo vs NPK	*	*

[†] Niveau de signification de l'analyse de variance : *, **, ***, ns indiquent significatif à $P \leq 0,05, 0,01, 0,001$, et non significatif, respectivement.

[‡] Comparaison des moyennes par la différence des moindres carrés. La dose de FS est exprimée en pourcentage d'équivalent minéral tel qu'estimé *a priori*.

Tableau 52. Coefficient d'utilisation et d'efficacité fertilisante du P de divers produits organiques.

AEOs ¹	C/N	Type de sol	Culture	CUA ² (%)		CE ⁴ AEOs ----- (%) -----
				EM ³	AEOs	
Boues mixtes de papetières ⁵	18	Loam limono-argileux	Maïs-grain	62	92	148
Boues mixtes de papetières ⁵	17	Loam limoneux	Maïs-grain	37	63	170
Compost de boues de désencrage et de fumier de poulets ⁶	27	Loam	Haricot	-	-	126
Valeurs références⁷						
Fumier de bovins	-	-	-	-	-	65
Lisier et purin de bovins	-	-	-	-	-	80
Lisier de porcs	-	-	-	-	-	80
Fumier de volailles	-	-	-	-	-	65
Lisier de volailles	-	-	-	-	-	80

¹ AEOs : amendement et engrais organique.

² CUA : coefficient d'utilisation apparente.

³ EM : engrais minéral.

⁴ CE : coefficient d'efficacité.

⁵ Adapté de N'Dayegamiye (1998).

⁶ Adapté de Baziramakenga et Simard (2001).

⁷ Coefficients moyens d'efficacité de 1^{ère} année des éléments fertilisants des engrais de ferme (CRAAQ 2003).

3.5.3 Valeur économique

La comparaison des valeurs fertilisantes en N et P de la FSLP_c avec celles des engrais minéraux permet, dans le cadre de ce projet, de calculer une valeur économique en tant qu'engrais pour la FSLP_c. Ainsi, sur la base des CE (tableaux 47 et 50) du N et P, une tonne fraîche de FSLP_c contient en moyenne 22 kg de N et 80 kg de P₂O₅ efficace. Afin d'avoir une valeur complète, l'efficacité du K doit aussi être considérée. Puisque le CE du K n'a pas été évalué dans le cadre de cette étude, une valeur de 90 % est retenue sur la base des valeurs de référence (CRAAQ 2003). Sur cette base, une tonne fraîche de FSLP_c contiendrait donc en moyenne 10 kg de K₂O efficace. Le K est en effet habituellement très disponible dans l'ensemble des AEOs testés en agriculture puisqu'il est majoritairement sous forme inorganique dans ces produits et qu'il a peu tendance à se fixer aux particules de sol. La FSLP_c est donc, en termes d'engrais efficaces, l'équivalent d'une formulation 2-8-1. Selon cette formulation, au prix⁶ des engrais achetés lors de la réalisation de cette expérience, une tonne fraîche de FSLP_c vaudrait 296 \$ t⁻¹. En plus de cette valeur économique, il faut aussi considérer la valeur ajoutée octroyée à la FSLP_c par la nature majoritairement colloïdale de son matériel (C facilement minéralisable) et par son ample contenu en éléments nutritifs mineurs, dont sont dépourvus les engrais minéraux.

Le prix calculé selon les CE mesurés est tout à fait comparable à celui de certains engrais organiques granulés actuellement sur le marché, tel Acti-sol. L'Acti-sol est un fumier séché de poules pondeuses auquel un CE de 70 % est attribué au contenu total en N. Cet engrais est vendu comme une formulation 4-4-2 selon deux tailles de granule. Une première granulation fine de 250 SCG, pouvant être utilisée directement dans le planteur à maïs, et destinée aux producteurs, est actuellement distribuée à 150 producteurs à un coût de 327 \$ t⁻¹. Une seconde granulation, dite régulière de 3 mm par 6 mm, destinée aux consommateurs de grandes surfaces recherchant un produit d'usage domestique pour les jardins et pelouses privés, est pour sa part vendue au prix de 10 \$ le 20 kg (500 \$ t⁻¹). Il existe également en France un engrais granulé composé d'une FSLP déshydratée et de fientes de volailles nommé « Kappa » (www.deleplanque.fr). Cet engrais est un

⁶ Prix agriculteurs au 15 mai 2009 : 928 \$ t⁻¹ 27-0-0, 1 150 \$ t⁻¹ 0-46-0, 1 192 \$ t⁻¹ 0-0-60

2-5-2 (figure 3). Au taux de matière sèche utilisé au champ, il contient 25 kg N efficace t^{-1} , dont 21 kg proviennent du N_0 apporté par la FSLP. Il contient aussi 50 kg de P_2O_5 et 30 kg de K_2O efficace par tonne appliquée. L'ajout de fientes de volailles sert probablement à hausser le contenu en N disponible. L'ISB du « Kappa » est similaire à celui de la FSLP_c avec une valeur de 0,31. Cet engrais est vendu aux agriculteurs en grandes quantités pour application au champ au printemps dans la culture de la pomme de terre, du maïs, du colza et de la betterave à sucre. Le 'Kappa' est livré par camion de 27 t et son stockage se fait au sec, sous hangar, en tas, pour une période allant jusqu'à 8 à 10 mois. Ces engrais illustrent les possibilités de commercialisation s'adressant à la FSLP_c qui s'ajoutent à sa valorisation directe (fraîche non granulée) au champ par les producteurs de porcs sur leurs propres terres ou par des receveurs. Évidemment, une étude économique de marché serait à réaliser afin de vérifier si la valeur marchande d'un engrais granulé de FSLP_c couvrirait les coûts de granulation et/ou de transport tout en laissant une marge de profit viable.



Figure 3. Engrais Kappa composé de lisier déshydraté de porcs et de fientes de volailles granulées (www.deleplanque.fr).

Une fois son potentiel comme fertilisant connu, il devient beaucoup plus facile de promouvoir et de développer l'utilisation de la FSLP_c dans une multitude de cultures, telles que les grandes cultures ou les cultures maraîchères. En fait, au Québec, les besoins en engrais N et P sont très importants. En 2008, les producteurs agricoles ont dû fournir à leurs cultures 199 910 t de N et 77 413 t de P_2O_5 (données internes MAPAQ, 2008). De ces quantités, seules 43 745 t de N et 42 724 t de P_2O_5 ont été fournies par des engrais de ferme (données internes MAPAQ, 2008). Ainsi, pour compléter les besoins en P_2O_5 non comblés par les engrais de ferme, soit 34 649 t de P_2O_5 , 433 113 t de FSLP_c devraient être utilisées. En se référant à Martin et coll. (2006), qui estiment qu'une tonne de lisier brut à 5 % de MS centrifugée puis conditionnée génère 0,036 t de FSLP_c, il faudra 12 M t de lisier brut pour produire la quantité de FSLP_c permettant de combler les besoins en P_2O_5 mentionnés ci-haut. En nombre de fermes impliquées, ceci représenterait 2 857 entreprises porcines de 2000 porcs-emplacement produisant 4 200 t de lisier par année. En estimant la production de lisier brut par porc à environ 2 t dans sa vie utile (CRAAQ 2005), c'est donc les déjections de près de 6 M de porcs qu'il faudrait mettre à contribution pour combler ce manque de P_2O_5 , soit près de la production de têtes de 2009 (FPPQ 2010). Et ceci ne tient pas compte du lisier déjà valorisé dont les quantités épandues se fondent dans les 42 724 t de P_2O_5 fournies par les engrais de ferme. Évidemment, combler l'ensemble des besoins agronomiques en P_2O_5 dans la province est non plausible dû à certaines particularités de sol, de site ou de cultures produites. Toutefois, cela illustre la place laissée libre pour la

valorisation d'AEOs comme la FSLP_c. D'autant plus qu'à ces besoins agricoles, il faut ajouter ceux de certains secteurs non traditionnels, grands consommateurs d'engrais et qui couvrent de grandes superficies, tels les terrains de golf ou les propriétés urbaines des particuliers, qui deviendraient accessibles à recevoir la FSLP_c si celle-ci était granulée ou intégrée dans un EOMs.

D'un point de vue monétaire, compte tenu que la valeur économique de la FSLP_c s'établit à 296 \$ t⁻¹, ces 433 113 t de FSLP_c représentent un potentiel commercial non négligeable de 128 M\$. De plus, ce montant ne considère pas que l'accès au secteur résidentiel aurait également pour impact de modifier à la hausse le prix au kilogramme de la FSLP_c puisque les particuliers se procurent les engrais dont ils ont besoin le plus souvent en sacs de 5-20 kg. Par exemple, certains engrais organiques granulés se détaillent 10 \$ le 20 kg. Par ailleurs, à l'échelle de la ferme, pour une production porcine de 2000 porcs-emplacement produisant 4 200 t de lisier par année, la vente de FSLP_c pourrait résulter en un gain économique annuel de plus de 44 000 \$. À lui seul, ce gain amortirait les frais annuels d'environ 33 457 \$ décrits par Martin et coll. (2006) dans leur simulation technico-économique pour installer et opérer une unité de séparation utilisant un décanteur centrifuge (conditionnement inclus).

3.6 Effectuer le transfert de connaissances entre le laboratoire de SGA (Sols et génie agroalimentaire) l'Université Laval et le laboratoire de l'IRDA afin de rendre accessible à l'industrie et aux producteurs la méthodologie permettant de calculer l'indice de stabilité biologique (ISB)

À la suite de l'acquisition de la présente subvention, le Laboratoire d'analyses agroenvironnementales de l'IRDA a pu acquérir l'équipement essentiel à la détermination analytique de l'ISB. Une fois les équipements implantés, le savoir-faire en regard du dosage de l'ISB a été transféré par les membres du laboratoire du Dr Léon-Étienne Parent du Département des Sols et de génie agroalimentaire de l'Université Laval aux employés désignés du laboratoire de l'IRDA. Le personnel devant effectuer les analyses d'ISB au sein du laboratoire de l'IRDA a été invité à examiner les appareils et à obtenir une formation relative à leur fonctionnement. Ces démarches ont permis d'implanter dans un laboratoire d'accès public une méthodologie novatrice qui est désormais accessible en exclusivité à l'industrie et aux producteurs.

3.7 Caractériser la FSLP_c sur la base de l'ISB afin de pouvoir ultérieurement la comparer aux divers amendements organiques utilisés en agriculture

La difficulté de prédire avec assurance la valeur fertilisante azotée et phosphatée des AEOs limite grandement leur valorisation agricole. L'absence d'indices accessibles et calibrés permettant d'évaluer cet aspect pénalise tant ceux qui génèrent les AEOs, que les utilisateurs potentiels qui pourraient en bénéficier. Il est en effet hasardeux d'utiliser des AEOs dont la valeur fertilisante n'a pas été établie puisque la nutrition N et/ou P est un élément clé de la productivité des plants. Les producteurs doivent donc s'assurer de combler les besoins en N et P des cultures. Devant cette incertitude, l'utilisation des biomasses non caractérisées est très peu retenue. Cette absence de demande maintient leur valeur résiduelle à un faible niveau, dirigeant des AEOs qui présenteraient peut-être un potentiel de valorisation agricole intéressant vers la disposition, avec les conséquences économiques qui en découlent. Par exemple, les producteurs ne peuvent

bénéficier d'une baisse des coûts d'achat des engrais minéraux et de l'impact positif d'apports d'AEOs sur le maintien de la structure et de la productivité des sols. Au niveau environnemental, l'impact est aussi important. Par exemple, des AEOs dont la valeur fertilisante est méconnue sont parfois utilisés, mais leur application est complétée par une fertilisation minérale N ou P à des doses ne tenant pas compte ou sous-estimant le N et P apportés par les AEOs. Ceci hausse les risques de pollution diffuse occasionnés par les surplus d'éléments N et P.

Au niveau de la fertilisation azotée, puisque les cycles du C et du N sont intimement liés, le rapport C/N est utilisé depuis plusieurs années pour tenter d'estimer la contribution en N des AEOs. Toutefois, le C/N est déconseillé pour comparer des AEOs d'origines diverses ou des AEOs compostés puisqu'il est basé sur les contenus totaux en N et C et ne tient pas compte de leur nature biochimique, et donc de leur résistance à la minéralisation. Un indice de stabilité biologique (ISB) qui considère l'existence des différentes fractions qui composent un AEO selon leur taux de résistance à la minéralisation a donc été développé pour pallier cette lacune (Linères et Djakovitch 1993, Robin 1997). Grâce à cette mesure différentielle des fractions de la MO, l'ISB est ainsi beaucoup plus corrélé au N potentiellement minéralisable d'un AEO que son rapport C/N (Nduwamungu 2006), ce qui en fait un outil très intéressant pour étudier le potentiel de valorisation des AEOs.

Tableau 53. Détermination de l'ISB (b.s.) des FSLP_c utilisées à l'été 2007 et 2008.

Années †	--- Contenu en MO (base organique) ---				----- ISB [‡] -----		
	SOL	HEM	LIC	CF	----- Gabrielle et coll. (2004) -----		Tremblay (2008)
	----- (%) -----				Base matière totale	Base organique	Base organique
	----- (%) -----				----- (%) -----		
2007	56,3	12,1	27,1	9,4	45,5	71,3	52,4
2008	70,8	9,1	16,6	10,3	27,1	38,4	32,4

† Les valeurs présentées sont les moyennes des sous-échantillons pour chacune des années (2007, n = 4; 2008, n = 5).

‡ ISB : indice de stabilité biologique.

§ Fractions solubles, SOL; hémicellulose, HEM; lignine et cutine, LIC; fibres brutes, CF.

Dans notre étude, les mesures d'ISB de la FSLP_c ne sont pas similaires à chacune des années (tableau 53). Cette différence s'explique du fait que le dosage de l'ISB de la FSLP_c de 2007 n'a pas pu être effectué dans le même délai, suite à son application au champ, que celui réalisé pour la FSLP_c de 2008. En effet, puisque l'implantation de la méthode de dosage de l'ISB se déroulait en parallèle au volet champ du projet, la méthode n'était pas disponible en 2007. Ainsi, le dosage de l'ISB des deux FSLP_c s'est fait au même moment, au printemps 2008. L'échantillon de FSLP_c de 2007, conservé pour analyse, a donc poursuivi sa maturation une année de plus, donnant une valeur d'ISB différente de celle de la FSLP_c de 2008. Les résultats sont d'ailleurs concordants avec cette réalité puisque la FSLP_c de 2007 présente un ISB plus haut, indiquant un matériel organique plus stable, que celui de 2008. Dans le cas d'une valorisation annuelle, utilisant la FSLP_c produite et conditionnée dans les quelques mois précédant son utilisation, l'ISB présenterait donc plutôt une valeur se situant autour de celle de 2008. Ainsi, selon la méthode choisie pour calculer l'ISB, la FSLP_c présenterait des valeurs d'ISB entre 27,1 et 38,4 % (tableau 53), ce qui somme toute est relativement bas.

Les résultats de caractérisation d'ISB de divers AEOs par Linères (2002) appuient les valeurs d'ISB trouvées pour la FSLP_c. En fonction des données publiées par cet auteur, avec une valeur de 38 %, l'ISB de la FSLP_c se positionne en effet entre les déjections compostées et les fumiers de bovins (figure 4), produits plus proches de la FSLP_c que les produits comme les écorces et la tourbe, aux valeurs beaucoup plus fortes. Les valeurs des quatre fractions organiques dosées (tableau 53) peuvent aussi servir à distinguer les produits relativement labiles dans le sol, qui ont donc un comportement agronomique de type « engrais organique », des produits plus stables qui ont un comportement de type « amendement organique » puisque la fraction soluble et les hemicelluloses se minéralisent rapidement, tandis que la cellulose, la lignine, et la cutine se décomposent lentement (Robin 1997). D'un point de vue agronomique, quatre groupes sont habituellement distingués : (1) les engrais organiques constitués de produits riches en fraction soluble et N_{tot} facilement minéralisable, (2) les amendements organiques constitués de produits riches en cellulose et lignine (somme > 65 % de la MO), (3) les produits riches en fraction soluble et hémicellulose à faible rendement en humus et (4) les produits riches en matières minérales à faible teneur en carbone organique n'ayant pas de grande valeur organique, mais plutôt une valeur fertilisante (Satege 2007). Sur cette base, la proportion des diverses fractions mesurées pour la FSLP_c de 2008 (tableau 53) classe définitivement la FSLP_c dans la catégorie des engrais organiques, avec une proportion en SOL de 70,8 %, d'autant plus qu'elle est riche en N_{tot} dont plusieurs mesures ont indiqué la grande facilité de minéralisation. Même après 1 ½ an, la FS 2007, qui a mûri en tas sans retournement, présente toujours 56,3 % de SOL en moyenne. Tout ceci vient encore une fois appuyer la grande valeur fertilisante du N observée au champ les deux années, ayant produit des CE élevés.

Figure 4. Variabilité de l'ISB mesuré en laboratoire de divers AEOs (adaptée de Linères 2002). Méthode d'ISB sur base organique.

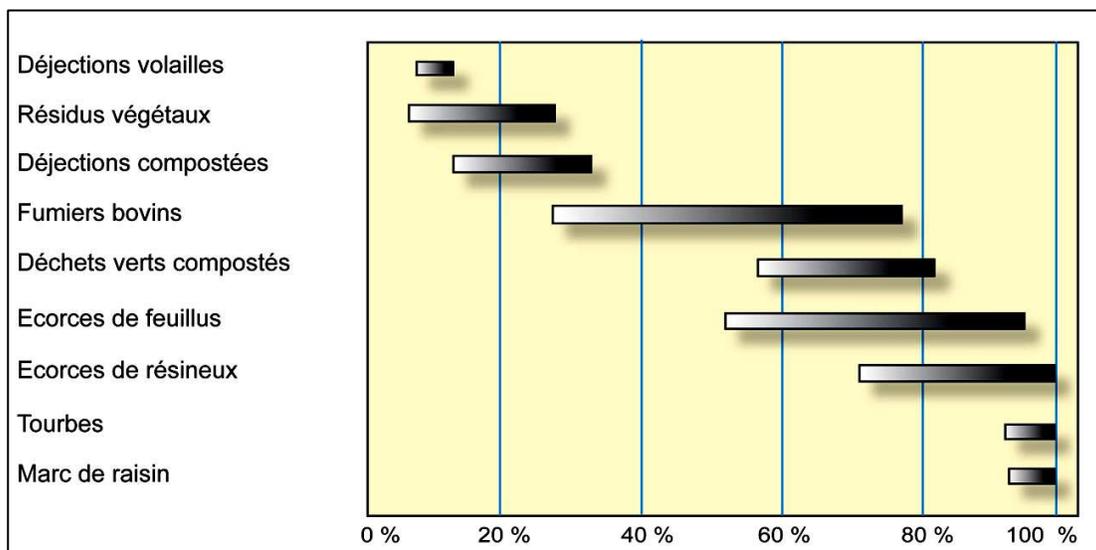


Tableau 54. Analyse de 30 AEOs produits au Québec sur la base de leur ISB.

Description des AEOs	ISB (%) [†]	Groupe [‡]
Boues brutes de lisier	35,9	faible
Fumier granulé de volailles	38,6	faible
Fumier brut de poudeuses	40,7	faible
Litière brute de volailles	43,1	faible
Litière brute de porcs	44,2	faible
Mélange granulé de litière de bétail	44,4	faible
Mélange granulé de litière de poules et de fumier de porcs	45,9	faible
Compost de boues municipales	46,2	faible
Litière brute de bovins	46,9	faible
Compost de boues d'abattoirs de 5 mois	52,5	faible
Compost de boues de papetières de 6 mois	60,2	moyen
Compost de boues d'abattoirs de 10 mois	62,6	moyen
Compost de boues de papetières de 12 mois	65,4	moyen
Compost de résidus organiques de Comté	70,2	moyen
Compost de fumier de 6 mois	74,0	moyen
Compost de fumier de vaches	76,9	moyen
Compost d'un mélange de crevettes, de fumier et de mousse de tourbe	80,7	élevé
Compost d'un mélange de FTCA [§]	83,1	élevé
Compost bio-correcteur	84,0	élevé
Tourbe de Sphaigne de Saint-Henri de Lévis	86,9	élevé
Compost d'un mélange de farine de crabeS et d'algues marines	87,0	élevé
Compost de résidus forestiers	87,9	élevé
Compost de fumier de 12 mois	88,7	élevé
Compost de résidus de plantes de 6 mois	90,3	élevé
Compost bio-plus	90,8	élevé
Compost de fumier de poulets	92,3	élevé
Compost de résidus de plantes de 12 mois	92,5	élevé
Tourbe de Sphaigne de Saint-Lambert	92,8	élevé
Compost d'un mélange de tourbe et de crevettes	93,7	élevé
Compost de fumier de moutons	94,6	élevé

Adapté de Nduwamungu (2006).

[†] ISB selon Gabrielle et coll. (2004) sur base organique.

[‡] Groupe de stabilité du carbone.

[§] FTCA = Fumier, mousse de tourbe, farines de crustacés et d'algues marines.

Une fois l'ISB connu, il nous est possible de classer la FSLP_c parmi divers AEOs québécois grâce aux travaux de Nduwamungu (2006) (tableau 54) ayant établi l'ISB de 30 AEOs produits au Québec. Avec son ISB de 38 %, la FSLP_c se positionne une fois encore dans la classe des produits ayant, selon l'auteur, une faible stabilité du C. Autrement dit, la valeur d'ISB indique que la FSLP_c devrait se minéraliser rapidement une fois ajoutée au sol. Ceci concorde parfaitement avec les résultats obtenus en champ qui démontre le potentiel de minéralisation de la FSLP_c dès le stade floraison. Selon Nduwamungu (2006), cette classe d'AEOs, qui regroupe aussi un mélange de « litière de poules et fumier granulé de porcs » et une litière brute de porcs, serait particulièrement intéressante pour la formulation d'engrais organo-minéraux. Ceci confirme

les conclusions tirées des analyses biochimiques de caractérisation de la FSLP_c (section 3.1), de même que de l'excellente nutrition et croissance (section 3.2) rapportées pour les plants fertilisés avec la FSLP_c. Les fumiers granulés de volailles, reconnus pour leur fertilité N, se retrouvent d'ailleurs dans ce même groupe.

Selon les travaux de Parent et coll. (2007), qui ont aussi travaillé avec l'ISB des AEOs, un ISB de 38 % indique qu'une bonne disponibilité du N de la FSLP_c peut être attendue. Ces auteurs ont en effet testé en laboratoire le potentiel de minéralisation du N_o de divers AEOs selon leur ISB en rapportant la quantité de N minéral produite au total durant l'incubation selon la quantité de N_o présente au départ de l'incubation dans l'AEO (figure 5). Selon leurs résultats, les AEOs testés se classaient en 3 groupes distincts selon que leur ISB était < 56 %, entre 56 et 80 % ou > 80 %. Avec une valeur de 38 %, la FSLP_c se classe donc dans les produits générant le plus de N minéral par kg de N_o. Ceci concorde à nouveau avec les résultats obtenus au champ qui ont permis de calculer pour 2007 et 2008 un CE du N de la FSLP_c de 64 %, indiquant une très bonne disponibilité du N_o contenu dans cet AEO (tableau 47).

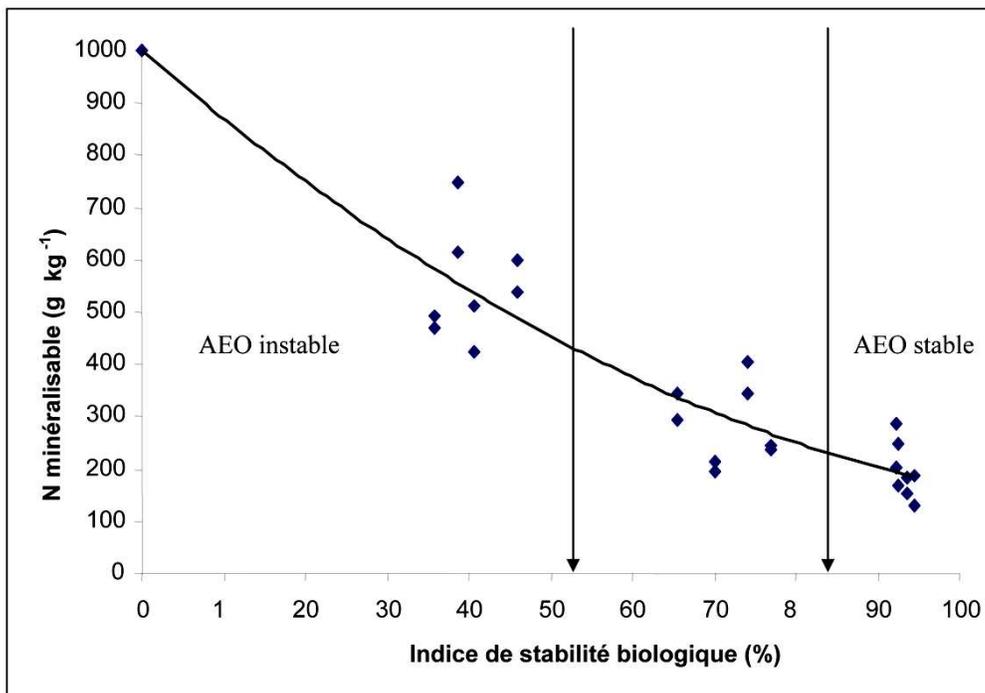


Figure 5. Relation entre le N minéral produit par minéralisation par kg de N_o contenu dans un produit selon son ISB pour divers AEOs (adaptée de Parent et coll. 2007). Méthode d'ISB de Gabrielle et coll. (2004) exprimés sur base organique.

4. DIFFUSION DES RÉSULTATS

<i>Activités prévues</i>	<i>Activités réalisées</i>	<i>Description</i>	<i>Date de réalisation</i>	<i>Nombre de gens rejoints</i>	<i>Visibilité accordée au CDAQ et à AAC</i>
Parution d'une fiche descriptive du projet et des partenaires impliqués sur le site WEB de l'IRDA www.irda.qc.ca	Fiche descriptive	Description du projet (objectifs, durée et partenaires) dans les pages WEB des projets en cours sur le site de l'IRDA	Mars 2007	Toutes les personnes qui consultent le site WEB de l'IRDA	Noms des partenaires
Parution d'une fiche technique du projet sur le site WEB de l'IRDA www.irda.qc.ca	Fiche technique de présentation et de démarrage du projet	Efficacité fertilisante de la fraction solide de lisier de porcs centrifugé dans la culture de pommes de terre	Mise en ligne le 8 juillet 2008	Toutes les personnes qui consultent le site WEB de l'IRDA	Logo, nom des partenaires
Présentation du projet et des parcelles expérimentales lors de journées régionales d'informations	Portes ouvertes	Journée de démonstration des parcelles expérimentales à Deschambault	10 juillet 2008	Environ 120 personnes : agriculteurs et agronomes	Logo, noms des partenaires
Entrevue pour la télévision	Capsule télé CRJS Porneuf	Présentation du projet	Juillet 2008	Indéterminé	Logo, noms des partenaires
Tournée VIP	Tournée des essais avec les membres de l'IDtech	Rencontre et présentation du projet au comité IDtech	Juillet 2008	Environ 11	Logo, noms des partenaires
Présentation des résultats préliminaires au CDAQ	Rapport d'étape	Dépôt du rapport d'étape au CDAQ	2009	Variable	Logo
Diffusion des résultats auprès d'auditoires plus spécialisés au niveau provincial	Présentation d'une affiche au 23 ^e colloque de l'AQSSS « Évaluation de l'efficacité fertilisante en N et P de la fraction solide de lisier de porcs »	Présenter les résultats préliminaires aux différents conseillers et producteurs qui assistaient au colloque	19 mai 2009	Environ 300 personnes assistaient au colloque	Logo, mention des partenaires
Activités de transfert	Rencontre des administrateurs de la Fédération des producteurs de porcs du Québec (FPPQ)	Présentation des résultats du projet; rencontre et discussion avec les administrateurs de la FPPQ	19 février 2010	15 personnes étaient présentes à la réunion	Logo, mention des partenaires
Rapport final	Rédaction du rapport final	Rédaction et livraison du rapport final	17 janvier 2011	Indéterminé	Logo et mention du programme DS
Articles dans PorcQuébec			À venir		

5. CONCLUSION

- **Retombées prévues à court terme, moyen terme et à long terme pour le secteur**

Les démarches entreprises lors de ce projet ont permis d'implanter dans un laboratoire d'accès public une méthodologie novatrice qui est désormais accessible en exclusivité à l'industrie et aux producteurs. L'établissement des ISBs des AEOs produits au Québec s'en trouvera facilité. L'accessibilité à cette méthode d'analyse ouvre la voie à l'établissement d'une charte d'ISBs pour les AEOs d'origines municipale, industrielle et agricole produits au Québec. Une telle charte bénéficierait aux agronomes et producteurs. Pouvoir déterminer le potentiel fertilisant des AEOs favoriserait la valorisation de biomasses autrement destinées à la disposition en leur donnant une valeur commerciale, évitant ainsi que des AEOs ayant un potentiel agricole intéressant soient considérés comme des déchets.

L'établissement des CE du N (64 %) et du P (100 %) de la FSLP_c est une primeur. Leur connaissance améliorera la précision et la validité des calculs de fourniture en N et P de la FSLP_c, facilitant son adoption dans les plans de fertilisation. Ces connaissances donnent ainsi une valeur fertilisante précise à la FSLP_c, évitant que soit sous-estimée sa contribution à la fertilisation N et P des cultures et que des doses complémentaires excessives d'engrais minéraux soient ajoutées, avec les risques de pollution diffuse qui en découleraient. Cette connaissance encourage également les receveurs à établir des ententes d'épandage. De plus, la démonstration de la valeur fertilisante et de l'action bénéfique de la FSLP_c sur l'activité biologique des sols sensibilisera le milieu sur le potentiel agricole et économique d'AEOs de même nature.

Les connaissances acquises, en permettant le développement de filières durables de valorisation, permettent aussi de bonifier le cycle de vie du N et du P, diminuant la demande en engrais minéraux qui doivent être importés de loin et dont la production et l'extraction sont sources de pollution. Cette contribution à réduire l'emploi des engrais de synthèse démontrera que la production porcine peut contribuer au développement durable de l'agriculture québécoise. Et le potentiel est grand car au Québec, seules 42 724 t des 77 413 t de P₂O₅ nécessaires aux cultures annuellement sont comblées par des engrais de ferme. Ainsi, le remplacement des engrais de synthèse par la FSLP_c pour compléter la part des besoins non comblés par les engrais de ferme mobiliserait 433 113 t de FSLP_c. Sa fabrication requerrait 12 M t de lisier brut, impliquant l'équivalent de 2 857 entreprises de 2000 porcs-place ou les déjections de près de 6 M de porcs, soit près de la production de têtes de 2009. Et ceci ne tient pas compte du lisier déjà valorisé dans la part des besoins déjà assurée par les engrais de ferme. En termes monétaires, ces 433 113 t de FSLP_c représentent un potentiel commercial non négligeable de 128 M\$ (296 \$ t⁻¹ FSLP_c). Évidemment, combler l'ensemble des besoins restants en P₂O₅ est peu plausible dû à certaines particularités de sol, de site ou de production. Toutefois, cela illustre la place laissée libre pour la valorisation de la FSLP_c, d'autant plus que certains secteurs non traditionnels, grands consommateurs d'intrants (golf, résidentiel), ne sont pas considérés dans ce calcul et deviendraient accessibles si la FSLP_c était granulée ou intégrée dans un EOMs. L'accès au secteur résidentiel aurait également pour impact de modifier à la hausse le prix au kilo de la FSLP_c puisque les particuliers se procurent les engrais dont ils ont besoin le plus souvent en sacs de 5-20 kg. Par exemple, certains engrais organiques granulés se détaillent 10 \$ le 20 kg. Ce projet pourrait donc soutenir le développement d'engrais granulés. D'autant plus qu'à l'échelle de la ferme, pour une production porcine de 2000 porcs-emplacement (4 200 t de lisier an⁻¹), la

vente de FSLP_c rapporterait 44 000 \$ an⁻¹. À lui seul, ce gain amortirait donc les frais annuels (33 457 \$ an⁻¹) pour installer et opérer un séparateur décanteur centrifuge et conditionner la FSLP_c.

Ce projet permettra d'améliorer l'image de la production porcine en changeant la perception que les gens ont du lisier afin qu'il ne soit plus vu comme un rejet, mais comme un engrais à valeur ajoutée, à usages multiples dont toute la collectivité peut profiter. Ensuite, grâce aux connaissances acquises durant ce projet, les éleveurs auront la possibilité de faire un choix plus éclairé lorsque viendra le temps de choisir une technologie de traitement, particulièrement en regard de la conservation du N, dont la valeur a été prouvée, et de la mise en valeur du C fermentescible contenu dans le solide de lisier de porcs.

- **Recommandations découlant des résultats**

Suivant les résultats obtenus, la FSLP_c apparaît comme un excellent engrais organique, tant pour le N que le P. Cette valeur devrait être prise en compte et des techniques de séparation et de conditionnement permettant la conservation de cette fertilité devraient être encouragées. Entre autres, l'efficacité fertilisante du N, plus forte qu'attendue, est un argument de poids pour privilégier sa conservation et opter pour des modes de traitement qui ne causent pas sa déperdition. La FSLP_c pourra donc être valorisée directement sur les terres des producteurs ou chez des receveurs, avec des économies conséquentes sur les éléments fertilisants. Bien que son emploi soit possible dans un large éventail de conditions, sa valorisation sur des terres de richesse faible à modérée en P, avec des cultures ayant de grands besoins en cet élément, devrait toutefois être favorisée. De plus, la présente étude a démontré que les éléments mineurs apportés par la FSLP_c présentent également une très bonne disponibilité. Cette qualité donne une plus valeur à la FSLP_c, mais une attention particulière devra être portée à la fertilisation potassique dans les sols pauvres en K, ce qui est tout de même rare au Québec, afin d'éviter les déséquilibres cationiques, surtout si des cultures fourragères sont produites, étant donné le ratio K/(Ca+Mg) diminué de la FSLP_c. Enfin, le fort contenu en C très fermentescible de la FSLP_c en fait un excellent produit organique pour stimuler l'activité biologique des sols, avec les bénéfices qui en découlent. Tout comme sa richesse en N, P et éléments mineurs, cette qualité devrait donc être exploitée.

Les hauts CE du N et P de la FSLP_c, qui lui confèrent une valeur économique très intéressante, suggèrent aussi que son emploi éventuel pour la formulation d'engrais organiques granulés devrait être analysé, tant techniquement qu'économiquement. D'autant plus que la grande efficacité du P de la FSLP_c, couplée à son contenu très élevé, fait en sorte que les quantités devant être appliquées pour satisfaire des cultures, même exigeantes en P, sont faibles et seront difficiles à épandre. En fait, le fort impact bénéfique de la FSLP_c sur le maintien de la solubilité du P, tel que démontré avec le traitement Combo, indique que son utilisation dans la formulation d'EOMs pourrait être particulièrement intéressante, d'autant plus que la partie azotée apportée présente une efficacité significative qui pourra être prise en considération, diminuant les quantités de N minéral devant être apportées.

- **Éléments assurant la pérennité du projet**

Plusieurs types d'activités de transfert sont envisagés. L'IRDA, en tant qu'Institut, se porte d'ailleurs garant du caractère public des résultats obtenus, lesquels sont développés pour profiter au plus grand nombre. Les résultats seront diffusés lors de colloques visant la clientèle cible de ce projet (agronomes, producteurs porcins). Des articles de vulgarisation seront aussi publiés dans les journaux consultés par les producteurs, tel Porc-Québec. Nous viserons aussi des auditoires plus spécialisés (ex. Congrès de l'Association québécoise des spécialistes en sciences du sol). Enfin, les producteurs et les professionnels-conseils en agronomie ont pu prendre connaissance des résultats de ce projet lors de deux journées d'information de type « portes ouvertes ». Les documents produits seront également transmis sur le site d'Agri-Réseau.

Par ailleurs, à la suite de l'acquisition de la présente subvention, le Laboratoire d'analyses agroenvironnementales de l'IRDA a pu acquérir l'équipement et le savoir-faire essentiels à la détermination analytique de l'ISB. Les démarches entreprises ont donc permis d'implanter dans un laboratoire d'accès public une méthodologie novatrice qui est désormais accessible en exclusivité à l'industrie et aux producteurs.

- **Suites envisagées**

Plusieurs suites à ce projet de valorisation de la FSLP_c sont envisageables. Tout d'abord, via la disponibilité de la méthode de l'ISB, l'établissement d'une charte de valeurs d'ISBs pour les AEOs d'origines municipale, industrielle et agricole, produits et disponibles au Québec devrait être envisagé. Une telle charte n'existe pas en ce moment au Québec et bénéficierait aux agronomes et producteurs devant gérer la fertilisation des cultures. Elle profiterait aussi aux industriels, désireux de développer de nouveaux débouchés pour les AEOs du Québec, sous forme d'engrais granulés ou d'EOMs. Par ailleurs, considérant les nombreux débouchés commerciaux qu'elle offrirait au secteur porcin, la granulation de la FSLP_c comme engrais organique simple ou comme EOM devrait faire l'objet dès que possible d'études visant à en étudier la faisabilité technique et économique. De fait, à cause de son caractère biologique, ce type d'engrais connaît une ferveur importante, tant en grandes cultures, en horticulture, que pour des applications en milieu urbain. Pour sa part, la fraction liquide (FL) n'a fait, à ce jour, le sujet d'aucune étude détaillée pour sa valorisation comme fertilisant ou son usage comme source de bioénergie. Cette fraction semble pourtant *a priori* posséder une excellente valeur fertilisante N puisque le N n'est pas perdu lors de la centrifugation du lisier. De plus, le N se retrouvant dans la partie liquide est presque à 100 % inorganique, sous forme de N-NH₄, avec un CE probable de près de 100 %. Par ailleurs, tout comme dans le cas de la FS, plusieurs ratios d'éléments se retrouvent modifiés dans la FL comparativement au lisier brut. Ainsi, afin d'éviter des déséquilibres d'éléments ou des apports en N trop importants par une sous-estimation de sa valeur fertilisante, il serait nécessaire d'accompagner les utilisateurs des technologies de séparation afin qu'ils fassent un usage adéquat des rejets liquides de leurs installations. Finalement, lors de cette étude, la mesure de certains résidus de contaminants potentiels, tels les antibiotiques, n'a pas été réalisée.

Au Québec, quelques producteurs porcins utilisent présentement le séparateur décanteur centrifuge pour la gestion du lisier produit sur leur ferme. Dans la perspective des suites

potentielles de ce projet invoquées précédemment, il serait pertinent qu'une collaboration soit mise en place entre ces producteurs, la FPPQ et l'IRDA pour démarrer des projets de valorisation des sous-produits du séparateur. Ceci permettrait un encadrement scientifique et économique en vue d'une utilisation optimale de ces sous-produits ou pour le développement de nouveaux procédés qui en bonifieraient les qualités, tout en répondant aux besoins des producteurs.

6. HISTOIRE D'UNE RÉUSSITE

Au Québec, la production porcine s'est accrue à 7 768 335 têtes en 2009, créant des retombées de 1,5 G\$ an⁻¹ qui sont un atout considérable pour le développement de l'agriculture québécoise. Cependant, depuis 2010, le REA exige d'atteindre l'équilibre entre les apports de lisier et la capacité support des sols en P. Les applications de lisier ont donc dû être abaissées et des zones se sont retrouvées en surplus, créant un goulot d'étranglement pour cette production. Ainsi, en plus des efforts consacrés à l'amélioration des régies alimentaires et de l'eau, le traitement des lisiers offre à certaines entreprises une voie avantageuse permettant de se consolider. Cependant, le traitement des lisiers n'est pas une fin en soi et les sous-produits doivent être valorisés afin de ne pas créer un autre type de surplus. La création de débouchés durables pour les sous-produits d'une technologie de traitement est un prérequis à son adoption. Ce projet visait donc à démontrer l'efficacité fertilisante de la fraction solide de lisier de porcs conditionnée (FSLP_c), afin de la positionner avantageusement sur le marché des engrais organiques et d'appuyer le développement des engrais organo-minéraux (EOMs). Dans un premier temps, la méthode de l'indice de stabilité biologique (ISB) a été implantée avec succès au laboratoire de l'IRDA. L'établissement des ISBs des matières organiques produites au Québec s'en trouvera facilité, ouvrant la voie à l'élaboration d'une charte d'ISBs pour le bénéfice des agronomes, producteurs et industriels cherchant à valoriser ces produits directement ou sous forme d'EOMs. Ensuite, la FSLP_c a été caractérisée (ISB, nutriments, C, ÉTMs et *E. coli*). Puis, l'impact de sa valorisation au champ sur (1) le développement, la nutrition et le rendement des plants, (2) la fertilité chimique et biologique du sol et (3) l'évolution des paramètres agronomiques, des ÉTMs et des *E. coli* du sol, a aussi été testé. Des coefficients d'efficacité de 64 % du N et de 100 % du P ont été établis, lui conférant une valeur agronomique et économique (296 \$ t⁻¹) précise. Cette information facilitera son adoption dans les plans de fertilisation et contribuera à réduire d'autant l'emploi des engrais de synthèse, en plus de s'assurer d'apports adéquats de N et P, minimisant les risques de surfertilisation. Ceci démontrera que la production porcine peut contribuer au développement durable de l'agriculture québécoise, d'autant plus que la FSLP_c stimule la fertilité biologique des sols par son fort contenu en C très fermentescible et que son emploi ne comporte pas de risque accru de contamination par les ÉTMs ou les *E. coli*. Le potentiel est grand car 34 689 t des 77 413 t de P₂O₅ nécessaires aux cultures annuellement au Québec sont comblées par des engrais minéraux. Leur seul remplacement mobiliserait 433 113 t de FSLP_c, nécessitant 12 M t de lisier brut, soit l'équivalent du lisier produit par près de 6 M de porcs. Et ceci ne tient pas compte du lisier déjà valorisé annuellement. Il est donc question d'un potentiel commercial de 128 M\$. À l'échelle de la ferme, pour une production de 2 000 porcs-place, la vente de FSLP_c rapporterait 44 000 \$ an⁻¹. Évidemment, combler l'ensemble des besoins restants en P₂O₅ est peu plausible dû à certaines particularités de site ou de culture. Toutefois, cela illustre la place laissée vacante pour la valorisation de la FSLP_c. D'autant plus que certains secteurs non traditionnels, grands consommateurs d'intrants, ne sont pas considérés (golf, résidentiel) et deviendraient accessibles si la FSLP_c était granulée ou intégrée dans un EOMs. Considérant les nombreux débouchés commerciaux qu'elle a à offrir au secteur porcin, la granulation de la FSLP_c comme engrais organique simple ou comme EOM devrait donc faire l'objet dès que possible d'études de faisabilité technique et économique. Le potentiel de valorisation de la fraction liquide comme fertilisant ou source de bioénergie devrait aussi être exploré. Au Québec, quelques producteurs utilisent déjà un séparateur décanteur centrifuge. Dans la perspective des suites potentielles de ce projet, il serait pertinent qu'une collaboration soit mise en place entre ces producteurs, la FPPQ et l'IRDA.

7. RÉFÉRENCES

- Abdallahi, M.M. et N'Dayegamiye, A. 2000.** Effects of green manures on soil physical and biological properties and on wheat yields and N uptake. *Can. J. Soil Sci.* 80:81–89.
- AFNOR, 2005.** Fractionnement biochimique et estimation de la stabilité biologique : Méthode de caractérisation de la matière organique par solubilisations successives. Association française de normalisation. Norme XP U p. 44-162.
- Ajiboye, B., Akinremi, O.O. et Racz, G.J. 2004.** Laboratory characterization of phosphorus in fresh and oven-dried organic amendments. *In J. Environ. Qual.* 33:1062–1069.
- Akpakouma, A. 2009.** Qualités chimiques et biochimiques des solides de lisier de porc pour une formulation optimale d'engrais organo-minéraux. Mémoire de maîtrise Université Laval. 70 pages.
- Arfaoui, M.A., Simard, R.R., Bélanger, G., Laverdière, M.R. et Chabot, R. 2001.** Mixed papermill residues affect yield, nutritive value and nutrient use of a grass–alfalfa sward. *Can. J. Soil Sci.* 81:103–111.
- Bachand, C., Cinq-Mars, D., Leduc, R., Ouimet, B. et Pellerin, D. 2003.** Chapitre 5: Alimentation. 3^e édition. *Dans* Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (ed.) Viande Bovine : croissance et finition. CRAAQ, Ste-Foy, Québec. Pages 77-122.
- Bandick, A.K. et Dick, R.P. 1999.** Field management effects on soil enzyme activities. *Soil Biol. Biochem.* 31:1471–1479.
- Barker, A.V. 1997.** Composition and uses of compost. *Dans* J.E. Rechcigl et H.C. MacKinnon (eds.) Agricultural uses of by-products and wastes. ACS Symposium Series 668. ACS, Washington, DC. Pages 141-162.
- Baziramakenga, R. 2003.** Disponibilité du phosphore des biosolides et cendres d'industries papetières. *Agrosol.* 14 (1):4-14.
- Baziramakenga, R. et Simard, R.R. 2001.** Effect of de-inking paper sludge compost on nutrient uptake and yields of snap bean and potatoes grown in rotation. *Compost Science & Utilization* 9 (2):115-126.
- Baziramakenga, R., Simard, R.R. and Lalande, R. 2001.** Effect of de-inking paper sludge compost application on soil chemical and biological properties. *Can. J. Soil Sci.* 81:561–575.
- Béline, F., Daumer, M.-L. et Guiziou, F. 2003.** Traitement biologique aérobie du lisier de porcs : performances des systèmes de séparation de phases et caractéristiques des co-produits. *Ingénierie* 34:25-33.
- Bipfubusa, M., N'Dayegamiye, A. et Antoun, H. 2006.** Évaluation des effets de boues mixtes fraîches et de leurs composts sur les rendements des cultures et leur nutrition minérale. *Agrosolutions* 17 (1):65-72.
- Boivin, C. et Landry, C.P. 2008.** Cibler le stade phénologique optimal pour amorcer l'irrigation en lien avec le gain en pommes de terre et la perte des nitrates. Rapport final DS 6163 remis au Syndicat des producteurs de pommes de terre de la région de Québec et au Conseil pour le développement de l'agriculture du Québec. 51 pages.
- Bol, R., Kandeler, E., Amelung, W., Glaser, B., Marx, M.C., Preedy, N. et Lorenz, K. 2003.** Short-term effects of dairy slurry amendment on carbon sequestration and enzyme activities in a temperate grassland. *Soil Biol. Biochem.* 35:1411-1421.
- BNQ. 2005.** Amendements organiques – composts. Norme nationale du Canada. CAN/BNQ 0413-200. Bureau de normalisation du Québec. 27 pages.

- BPR-GREPA. 1999.** Le portrait agroenvironnemental des fermes du Québec. Rapport synthèse. 70 pages.
- Businelli, M., Altieri, R., Giusquiani, P.L. et Gliotti, G. 1999.** Complexation capacity of dissolved organic matter from pig slurry: A gel filtration and dialysis study. *Water, air and soil pollution* 113 (1-4):385-394.
- Cabral, F., Vasconcelos, E. et Cordovil, C.M.d.S. 1998.** Effects of solid phase from pig slurry on iron, copper, zinc, and manganese content of soil and wheat plants. *J. Plant Nutr.* 21 (9):1955-1966.
- Claude, P.-P. et Giroux, M. 2006.** Effet des engrais organo-minéraux inoculés (EOMI) sur la croissance des plants de maïs-grain, les rendements, les prélèvements des éléments nutritifs et la qualité des grains. *Agrosol* 17 (1):51-64.
- Chadwick, D.R., John, F., Pain, B.F., Chambers, B.J. et Williams, B. 2000.** Plant uptake of nitrogen from the organic nitrogen fraction of animal manures : a laboratory experiment. *J. Agric. Sci.* 134:159-168.
- Chantigny, M. et Angers, D. 2000.** Activité microbiologique et qualité des sols : quoi de neuf sous nos pieds? Colloque CRAAQ «Des outils d'intervention à notre échelle». Drummondville. 10 pages.
- Chantigny, M.H., D.A. Angers et Beauchamp, C.J. 1999.** Aggregation and organic matter decomposition in soils amended with de-inking paper sludge. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63:1214-1221.
- Charbonneau, H., Hébert, M. et Jaouich, A. 2001.** Portrait de la valorisation agricole des matières résiduelles fertilisantes au Québec – partie 2 : Contenu en éléments fertilisants et qualité environnementale. *Vecteur environnement* 34 (1):56-60.
- Chaussod, R. 1999.** Caractériser la matière organique: pourquoi et comment? Commentaires sur I.S.B. et K1. seconde partie. *Echo Mo* 16:1-2.
- Claude, P.-P. et Giroux, M. 2006.** Effet des engrais organo-minéraux inoculés (EOMI) sur la croissance des plants de maïs-grain, les rendements, les prélèvements des éléments nutritifs et la qualité des grains. *Agrosol* 17 (1): 51-64.
- Côté, D. 2005.** Guide de conception des amas de fumier au champ. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA), Québec. 71 pages.
- Côté C. et Quessy, S. 2005.** Persistence of *Escherichia coli* and *Salmonella* in surface soil following application of liquid hog manure for production of pickling cucumbers. *J. Food Prot.* 68 (5): 900-905.
- Côté, C, Villeneuve, A., Lessard, L. et Quessy, S. 2006.** Fate of pathogenic and nonpathogenic microorganisms during storage of liquid hog manure in Quebec. *Livestock Science* 102:204–210.
- Cordovil, C.M.d.S., Cabral, F. et Coutinho, J. 2000.** Dynamics of nitrogen in soil from organic mineralisation. *Dans* F. Sangiorgi (ed.) *Technology transfer. Proceedings of the 9th International Conference on the FAO ESCORENA Network on recycling of agricultural, municipal and industrial residues in agriculture.* Gargano, Italie, 6-9 septembre. Pages 118-123.
- Cordovil, C.M.d.S., Cabral, F., et Coutinho, J. 2007.** Potential mineralization of nitrogen from organic wastes to ryegrass and wheat crops. *Bioresource Technology* 98:3265-3268.
- Cordovil, C.M.d.S., Coutinho, J., Goss, M., et Cabral, F. 2005.** Potentially mineralizable nitrogen from organic materials applied to a sandy soil: fitting the one-pool exponential model. *Soil Use and Management* 21:65–72.

- CRAAQ. 2003.** Guide de référence en fertilisation du Québec. 1^{ère} édition. Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ). Ste-Foy, Québec. 293 pages.
- CRAAQ. 2005.** Charges fertilisantes des effluents d'élevage; valeur référence validée pour les volumes et concentrations d'éléments fertilisants. Valeurs références; production porcine sous gestion liquide des effluents d'élevage. Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ), Ste-Foy, Québec. 9 pages.
- Del Castilho, P., Dalenberg, J.W., Brunt, K. et Bruins, A.P. 1993.** Dissolved organic matter, cadmium, copper and zinc in pig slurry- and soil solution- size exclusion chromatography fractions. *Intern. J. Anal. Chem.* 50:91-107.
- Demers, I. 2008.** Formes et disponibilité du phosphore de composts utilisés comme amendements de sols agricoles. Mémoire de maîtrise. Département des sols et de génie agroalimentaire, Faculté des sciences de l'agriculture et de l'alimentation, Université Laval, Québec. 91 pages.
- Deschênes, L., Chassé, R., Giroux, M., Bastien, C., Jean, L., Beccart, V., Martineau, G. et Côté, G. 2004.** Développement d'une méthode d'évaluation de la mobilité et de la biodisponibilité des éléments traces métalliques d'un sol. Rapport d'étape 2, préparé pour le programme PARDE du MENV. 141 pages.
- Dou, Z., Knowlton, K.F., Kohn, R.A., Wu, Z., Satter, L.D., Zhang, G., Toth, J.D. et Ferguson, J.D. 2002.** Phosphorus characteristics of dairy feces affected by diets. *Environ. Qual.* 31:2058-2065.
- Eghball, B. 2000.** Nitrogen mineralization from field-applied beef cattle feedlot manure or compost. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64:2024-2030.
- Egrinya E.A., Honna, T., Yamamoto, S. et Masuda, T. 2003.** Influence of composting conditions on plant nutrient concentrations in manure compost. *J. Plant Nutr.* 26:1595-1604.
- Erich, M.S., Fitzgerald, C.B. et Porter, G.A. 2002.** The effect of organic amendments on phosphorus chemistry in a potato cropping system. *Agri. Eco. Env.* 88:79-88.
- Estevez, B., Coderre, D. et Pagé, F. 1992.** Effet de la fertilisation sur les vers de terre et leur impact sur la porosité et la stabilité structurale du sol. *Agrosol* 5 (2):26-31.
- Fox, T.R. 1995.** The influence of low-molecular-weight organic acids on properties and processes in forest soils. *Dans* W.W. McFee et J.M. Kelly (eds.) Carbon forms and functions in forest soils. SSSA, Inc. Madison, Wisconsin USA. Pages 43-62.
- Fox, R.H. et Piekielek, W.P. 1978.** A rapid method for estimating the nitrogen supplying capability of a soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 42:743-747.
- Fox, T.R., Comerford, N.B. et McFee, W.W. 1990.** Kinetics of phosphorus release from Spodosols: Effects of oxalate and formate. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54:1441-1447.
- FPPQ. 2010.** La production en chiffres [en ligne]. Disponible : <http://leporcduquebec.com/la-federation-fr/production/le-portrait-economique/la-production-en-chiffres.php><http://leporcduquebec.com/la-federation-fr/production/le-portrait-economique/la-production-en-chiffres.php> [consulté le 29 octobre 2010].
- FPPTQ. 2010a.** Portrait de la production [en ligne]. Disponible : <http://www.fpptq.qc.ca/portrait.htm> [consulté le 29 octobre 2010].
- FPPTQ. 2010b.** Plan d'action en agroenvironnement dans la production de pommes de terre [en ligne]. Disponible : <http://www.fpptq.qc.ca/environnement.htm> [consulté le 29 octobre 2010].
- FPPTQ. 2010c.** Modèle de coûts de production [en ligne]. Disponible : <http://www.fpptq.qc.ca/modele.htm> [consulté le 29 octobre 2010].

- Gabrielle, B., Da-Silveira, J., Houut, S. et Francou, C. 2004.** Simulating urban waste compost effects on carbon and nitrogen dynamics using a biochemical index. *J. Environ. Qual.* 33:2333-2342.
- Gagnon, B. 2004.** Contribution of on-farm and industrial composts to soil pH and enrichment in available nutrients and metals. *Can. J. Soil Sci.* 84:439-445.
- Gagnon, B. et Simard, R.R. 1999.** Nitrogen and phosphorus release from on-farm and industrial composts. *Can. J. Soil Sci.* 79:481-489.
- Gagnon, B., Robitaille, R. et Simard, R.R. 1999.** Characterization of several on-farm and industrial composted materials. *Can. J. Soil Sci.* 79:201-210.
- Gagnon, B., Ziadi, N. et Lafond, J. 2004.** Valorisation des boues mixtes de papetières en grandes cultures et en productions horticoles : leur impact sur le rendement, les propriétés du sol et l'environnement. *Agrosol* 15 (1):4-9.
- Gagnon, B., R. Lalande, R.R. Simard et Roy, M. 2000.** Soil enzyme activities following paper sludge addition in a winter cabbage-sweet corn rotation. *Can. J. Soil Sci.* 80:91-97.
- Gagnon, B., Nolin, M.C., Cambouris, A.N. et Bélanger, G. 2005.** Effets de l'application à taux variable d'engrais potassique et magnésien sur le rendement et la composition minérale du fourrage. *Agrosol* 16 (2):127-134.
- Garcia, C., Hernandez, T. et Costa, F. 1990.** Study on water extract of sewage sludge compost. *Soil Sci. Plant Nutr.* 37:399-408.
- Gasser, M.O. 2000.** Transformation et transfert de l'azote dans les sols sableux cultivés en pommes de terre (*Solanum tuberosum* L.). Thèse de doctorat. Université Laval. 200 pages.
- Gasser, M.O. et Laverdière, M.R. 2000.** Influence des facteurs de production sur la régie de la fertilisation azotée de la pomme de terre. *Dans* R. Landry et P. Levallois (eds.) *Agriculture intensive et écosystèmes régionaux: du diagnostic aux interventions.* Les Presses de l'Université Laval, Québec, Québec, Canada. Pages 197-217.
- Gasser, M.O., Laverdière, M.R. Lagacé, R. et Caron, J. 2002.** Impact of potato-cereal rotations and slurry applications on nitrate leaching and nitrogen balance in sandy soils. *Can. J. Soil Sci.* 82:469-479.
- Gigliotti, G., Kaiser, K., Guggenberger, G. et Haumaier, L. 2002.** Differences in the chemical composition of dissolved organic matter from waste material of different sources. *Biol. Fertil. Soils* 36:321-329.
- Giroux, M. et Tran, T.S. 1987.** Comparaison de différentes méthodes d'analyse de l'azote du sol en relation avec sa disponibilité pour les plantes. *Can. J. Soil Sci.* 67:521-531.
- Giroux, M. et Audesse, P. 2004.** Comparaison de deux méthodes de détermination des teneurs en carbone organique, en azote total et du rapport C/N de divers amendements organiques et engrais de ferme. *Agrosol* 15 (2):107-110.
- Giroux, M., Côté, D. et Morin, R. 2000a.** Effets des doses et des périodes d'épandage du lisier de porcs sur le rendement du canola et l'efficacité fertilisante de l'azote. *Agrosol* 11 (2):66-74.
- Giroux, M., Morin, R. et Lemieux, M. 2000b.** Effet de la fertilisation N, P et K et leurs interactions sur le rendement d'une prairie à dominance de mil (*Phleum Pratense* L.), la teneur en éléments nutritifs de la récolte et l'évolution de la fertilité des sols. *Agrosol* 11 (1):40-47.
- Giroux, M., Deschênes, L. et Chassé, R. 2004.** Bilan de transfert des éléments traces métalliques dans une prairie et un champ de maïs-grain fertilisés avec des engrais minéraux et des engrais de ferme. Site de Saint-Lambert de Lauzon. Cahier n°3. Cahiers de l'Observatoire de la qualité des sols du Québec. IRDA. 34 pages.

- Giroux, M., N'Dayegamiye, A. et Royer, R. 2007.** Effets des apports d'automne et de printemps de fumier et de boues mixtes de papetières sur le rendement, la qualité de la pomme de terre et de l'efficacité de l'azote. *Agrosolutions* 18 (1):25-34.
- Giroux, M., Chassé, R., Deschênes, L. et Côté, D. 2005.** Étude sur les teneurs, la distribution et la mobilité du cuivre et du zinc dans un sol fertilisé à long terme avec des lisiers de porcs. *Agrosol* 16 (1):23-32.
- Giroux, M., Rompré, M., Carrier, D., Audesse, P. et Lemieux, M. 1992.** Caractérisation de la teneur en métaux lourds totaux et disponibles des sols du Québec. *Agrosol* 5 (2):46-55.
- Giusquiani, P.L., Concezzi, L., Businelli, M. et Macchioni, A. 1998.** Fate of pig sludge liquid fraction in calcareous soil : agricultural and environmental implications. *J. Environ. Qual.* 27:364-371.
- Claude et Giroux 2006.** Effet des engrais organo-minéraux inoculés (EOMI) sur la croissance des plants de maïs-grain, les rendements, les prélèvements des éléments nutritifs et la qualité des grains. *Agrosolutions* 17 (1):51-64.
- Godbout, S., Pelletier, F., Lemay, S.P., Pouliot, F., Belzile, M., Marquis, A. Laverdière, M.R., Côté, D. et Côté, C. 2006.** La production porcine et l'environnement au Québec (Canada). *Journée recherche porcine* 38:321-332.
- Goulet, M. 2005.** Suivi agronomique de sous produits fertilisants issus d'un procédé de traitement du lisier de porc. *Mémoire UQ-INRS-ETE.* 174 pages.
- Gracian, C. 2000.** Phosphore et lisier de porc. *Solutions et gestion des boues. TechniPorc* 23 (3):7-16.
- Greenwood, D.J., Neeteson, J.J. et Draycott, A. 1985.** Response of potatoes to N fertilizer : Quantitative relations for components of growth. *Plant Soil* 85:63-183.
- Guerrero, C., Moral, R., Gómez, I., Zornoza, R. et Arcenegui, V. 2007.** Microbial biomass and activity of an agricultural soil amended with the solid phase of pig slurries. *Bioresource Technology* 98:3259-3264.
- Hébert, M. 1998.** Contamination des sols agricoles du Québec par les éléments traces. Situation actuelle et perspectives. *Agrosol* 10 (2):87-146.
- Hébert, M. 2005.** Pathogènes dans les biosolides municipaux et autres MRF : normes et critères de bonnes pratiques. *Agrosol* 16 (2):105-122.
- Hébert, M. 2008.** Guide sur la valorisation des matières résiduelles fertilisantes. Critères de référence et normes réglementaires. *Gouvernement du Québec.* 157 pages.
- Hébert, M., Rioux, V. et Gagnon, E. 2003.** Contrôle de qualité indépendant des MRF par le MDDEP - Partie 2 : pathogènes et paramètres agronomiques. *Vecteur Environnement* 36 (1):34-40.
- Hébert, M., Buset, G. et Groeneveld, E. 2008.** Bilan 2007 de la valorisation des matières résiduelles fertilisantes. *Gouvernement du Québec.* 14 pages.
- Helgason, B.L., Larney, F.J. et Janzen, H.H. 2005.** Estimating carbon retention in soils amended with composted beef cattle manure. *Can. J. Soil Sci.* 85:39-46.
- Hernández, D., Fernández, J.M., Plaza, C. et Polo, A. 2007.** Water-soluble organic matter and biological activity of a degraded soil amended with pig slurry. *Sci. Total Environment* 378:101-103.
- Hillel, D., Hatfield, J.L., Powlson, D.S, Rosenzweig, C., Scow, K.M., Singer, M.J. et Sparks, D.L. 2005.** *Encyclopedia of soils in the environment.* Elsevier Academic Press, Oxford, United Kingdom.
- Hunger, S., Sims, J.T. et Sparks, D.L. 2005.** How accurate is the assessment of phosphorus pools in poultry litter by sequential extraction? *J. Environ. Qual.* 34:382-389.

- Inbar, Y., Chen, Y. et Hadar, Y. 1990.** Humic substances formed during composting of organic matter. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54:1316-1323.
- Institut de la Statistique du Québec. 2010.** Industrie bioalimentaire, données régionales [en ligne]. Disponible : http://www.stat.gouv.qc.ca/donstat/econm_finnc/filr_bioal/donne_regionale/admin/index.htm [consulté le 29 octobre 2010].
- Isaac, A.R. et Johnson, W.C. 1976.** Determination of total nitrogen in plant tissue using a block digester. *J. AOAC* 59:98-100.
- Jackson, B.P., Bertsch, P.M., Cabrera, M.L., Camberato, J.J., Seaman, J.C. et Wood, C.W. 2003.** Trace element speciation in poultry litter. *J. Environ. Qual.* 32:535-540.
- Jedidi, N., Van Cleemput, O. et M'Hiri, A. 1995.** Quantification des processus de minéralisation et d'organisation de l'azote dans un sol en présence d'amendements organiques. *Can. J. Soil Sci.* 75:85-91.
- Kandeler, E. et Gerber, H. 1988.** Short-term assay of soil urease activity using colorimetry determination of ammonium. *Bio Fertil. Soil* 6:68-72.
- Kessler, J., Zogg, M. et Bachler, E. 1994.** Phosphor, kupfer und zink im schweinetrog (Phosphorus, copper and zinc in pigslurry). *Agrarforschung* 1:480-483.
- Khiari, L. et Parent, L.E. 2003.** Les engrais organo-minéraux à valeur ajoutée, pour une meilleure fertilisation intégrée des agrosystèmes. Colloque de l'Association québécoise des spécialistes en sciences des sols (AQSSS), 17^e congrès. Université de Sherbrooke.
- Khiari, L. et Parent, L.E. 2005.** Phosphorus transformations in acid light-textured soils treated with dry swine manure. *Can. J. Soil Sci.* 85:75-87.
- Lalande, R., Gagnon, B. et Simard, R. R. 1998.** Microbial biomass C and alkaline phosphatase activity in two compost amended soils. *Can. J. Soil Sci.* 78:581-587.
- Lalande, R., Gagnon, B. et Simard, R.R. 2003.** Papermillbiosolid and hog manure compost affect short-term biological activity and crop yield of a sandy soil. *Can. J. Soil Sci.* 83:353-362.
- Lalande, R., Gagnon, B., Simard, R.R. et Côté, D. 2000.** Soil microbial biomass and enzyme activity following liquid hog manure application in a long-term field trial. *Can. J. Soil Sci.* 80:263-269.
- Landry, C.P. et Boivin, C. 2010.** Impact de l'irrigation sur le devenir de l'azote des engrais minéraux dans la pomme de terre. Colloque sur l'irrigation en horticulture, Drummonville, Québec, 25 novembre [conférence].
- Larney, F.J. et Olson, A.F. 2006.** Windrow temperatures and chemical properties during active and passive aeration composting of beef cattle feedlot manure. *Can. J. Soil Sci.* 86:783-797.
- Larney, F.J., Sullivan, D.M., Buckley, K.E. et Eghball, B. 2006.** The role of composting in recycling manure nutrients. *Can. J. Soil Sci.* 86:597-611.
- Larouche, P., Martineau, Y., Pelletier, F. et Léveillé, F. 2005.** Évaluation par bilan massique du procédé Sequencia de traitement du lisier. *Agrisol* 16 (2):145-154.
- Levasseur, P. et Aubert, C. 2006.** Contexte, atouts et faiblesses des affluents porcins et avicoles destinés à être exportés. *TechniPorc* 29 (2):3-11.
- Linères, M. 2002.** Fertilisation de la vigne un point sur les préconisations: La matière organique [en ligne] Disponible : http://www.vignevin.com/fileadmin/users/ifv/publications/A_telecharger/Fich3_MatierOrgan.pdf [consulté le 29 octobre 2010].
- Linères, M. et Djakovitch, J.L. 1993.** Caractérisation de la stabilité biologique des apports organiques par l'analyse biochimique. *Dans* Decroux et Ignazi (eds.) *Matières organiques et agriculture. Quatrième journée de l'analyse de terre (Gemmas). Cinquième forum de la fertilisation raisonnée (Comifer)*, 16-18 novembre 1993. Pages 159-168.

- Magdoff, F.R. et Amadon, J.F. 1980.** Yield trends and soil chemical changes resulting from N and manure application to continuous corn. *Agron. J.* 72:161-164.
- Marinari, S., Ceccanti, B. et Grego, S. 2000.** Influence of organic and mineral fertilisers on soil biological and physical properties. *Bio. Tech.* 72:9-17.
- Martinez, J. et Pourcher, A.-M. 2008.** Cohabiter avec la production porcine : mythes et réalités. Forum sur la cohabitation en production porcine. CRAAQ, Drummonville, 19 février 2008.
- Martin, D.Y., Léveillé, F., Landry, C.P. et Carrier, R. 2006.** Installation et essais à la ferme d'un système de séparation solide-liquide du lisier de porcs complété par la stabilisation et l'entreposage de la fraction solide. Rapport final projet CORPAQ #703015. 100 pages.
- Masciandaro, G., Ceccanti, B. et Garcia, C. 1997.** Soil agro-ecological management: fertirrigation and vermicompost treatments. *Bio. Tech.* 59:199-206.
- Masciandaro, G., Ceccanti, B., Benedicto, S., Lee, H. C. et Cook, H. F. 2004.** Enzyme activity and C and N pools in soil following application of mulches. *Can. J. Soil Sci.* 84:19-30.
- Maynard, D.G. et Kalra, Y.P. 1993.** Nitrate and exchangeable ammonium nitrogen. Chapitre 4. Dans M.R. Carter (ed.) *Soil sampling and methods of analysis*. CSSS, Lewis Publishers, Florida. Pages 25-38.
- Mazzarino, M.J., Laos, F.L., Satti, P. et Moyano, S. 1998.** Agronomic and environmental aspects of utilization of organic residues in soils of the Andean-Patagonian region. *Soil Sci. Plant Nutr.* 44:105-113.
- McGill, W.B., Cannon, K.R., Robertson, J.A. et Cook, F.D. 1986.** Dynamics of soil microbial biomass and water-soluble organic C in Breton after 50 years of cropping to two rotations. *Can. J. Soil Sci.* 66:1-19.
- MDDEP. 2010a.** Milieu agricole. Réglementation [en ligne]. Disponible : http://www.mddep.gouv.qc.ca/milieu_agri/agricole/index.htm [consulté le 29 octobre 2010].
- MDDEP. 2010b.** Matières résiduelles fertilisantes (MRF) [en ligne]. Disponible : http://www.mddep.gouv.qc.ca/matieres/mat_res/fertilisantes/valorisation.htm [consulté le 29 octobre 2010].
- Mengel, K. 1996.** Turnover of organic nitrogen in soils and its availability to crops. *Plant Soil* 181:83-93.
- Miele, S. 1986.** The role of organic matter in agronomy practice and proposals for improving the humic balance of the soil. Dans R.G. Burns et coll. (eds.) *Humic Substances : Effects on soil and plants*. Redaedizioni per l'agricoltura. Pages 136-170.
- Minson, D.J. 1976.** Relation between digestibility and composition of feed. Dans H. Veenman et B.V. Zonen (eds.) *Carbohydrate research in plant and animals*. Landbouwhogeschool, Wageningen, Netherlands. Pages 101-114.
- Mohsen, B. et Mohsen, S. 2008.** Investigation of metals accumulation in some vegetables irrigated with waste water in shahre rey-iran and toxicological implications. *American-Eurasian J. Agric. & Environ. Sci.* 4 (1):86-92.
- Moral, R., Moreno-Caselles, J., Perez-Murcia, M.D., Perez-Espinosa, A., Paredes, C. et Bustamante, M.A. 2003.** Fertilizing capacity of fresh and composted solid fraction of swine manure on Brassica oleracea var. capitata. Proc 14th Intern. Symp Fertilizers, Debrecen (Hungary).
- Moral, R., Moreno-Caselles, J., Perez-Murcia, M.D., Perez-Espinosa, A., Paredes, C. et Sosa, F. 2006a.** The influence of fresh and composted solid fractions of swine manure slurry on yield of cucumber (*Cucumis sativus* L.). *Com. Soil Sci. Plant An.* 36:517-524.

- Moral, R., Moreno-Caselles, J., Perez-Murcia, M.D., Perez-Espinosa, A., Paredes, C. et Agulló, E. 2006b.** Micronutrient concentration in horticultural crops grown on a soil amended with the solid phase of pig slurry. *Com. Soil Sci. Plant An.* 37:2595–2603.
- Moral, M., Perez-Murcia, M.D., Perez-Espinosa, A., Moreno-Caselles, J., Paredes, C. et Rufete, B. 2008.** Salinity, organic content, micronutrients and heavy metals in pig slurries from South-eastern Spain. *Waste Management* 28:367–371.
- Moreno-Caselles, J., Moral, R., Perez-Murcia, M.D., Perez-Espinosa, A., Paredes, C. et Agulló, E. 2005.** Fe, Cu, Mn and Zn input and availability in calcareous soils amended with the solid phase of pig slurry. *Com. Soil Sci. Plant An.* 36:525–534.
- N'Dayegamiye, A. 1998.** Valorisation agricole des boues mixtes dans les cultures de maïs-grain et de soya. Rapport annuel de recherche. IRDA. 28 pages.
- N'Dayegamiye, A. 2006.** Mixed paper mill sludge effects on corn yield, nitrogen efficiency and soil properties. *Agron. J.* 98 :1471-1478.
- N'Dayegamiye, A. et Tran, T.S. 2002.** Effet de deux incorporations d'engrais verts sur le rendement du blé, la disponibilité en azote, ainsi que sur les propriétés physiques et biologiques du sol. *Agrosol.* 13 (1):47-57.
- N'Dayegamiye, A. et Seydoux, S. 2008.** Optimiser l'efficacité de l'azote des fumiers. Le producteur de lait québécois. Novembre : 34-36.
- N'Dayegamiye, A., Huard, S. et Thibault, Y. 2001.** Valeur fertilisante des boues mixtes de papetières (biosolides) dans des sols cultivés en maïs-grain, soya et orge. *Agrosol* 12 (1):25-34.
- N'Dayegamiye, A., Giroux, M. et Royer, R. 2003a.** Épandages d'automne et de printemps de divers fumiers et boues mixtes de papetières : rendements de maïs-ensilage, coefficients d'efficacité et accumulation de nitrates dans le sol. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA). Québec. 23 pages.
- N'Dayegamiye, A., Giroux, M. et Royer, R. 2004a.** Épandages d'automne et de printemps de divers fumiers et boues mixtes de papetières : coefficients d'efficacité et nitrates dans le sol. *Agrosol* 15 (2):97-106.
- N'Dayegamiye, A., Huard, S. et Thibault, Y. 2003b.** Influence of paper mill sludges on corn yields and N recovery. *Can. J. Soil Sci.* 83:497-505.
- N'Dayegamiye, A., Drapeau, A. et Laverdière, M.R. 2005.** Effets des apports de composts de résidus ménagers sur les rendements des cultures et certaines propriétés du sol. *Agrosol* 16 (2):135-144.
- N'Dayegamiye, A., Drapeau, A., Huard, S. et Thibault, Y. 2004b.** Intégration de boues mixtes et de fumiers dans des rotations agricoles : réponse des cultures et interactions avec les propriétés du sol. *Agrosol* 15 (2):83-90.
- Nduwamungu, C. 2006.** Stabilité biologique et pouvoir tampon des amendements et des engrais organiques. Thèse de doctorat. Université Laval. 110 pages.
- Nelson, D.W. et Sommers, L.E. 1982.** Total carbon, organic carbon and organic matter. Part 2. 2^e édition. *Dans* A.L. Page et coll. (eds.) *Methods of soil analysis.* Agronomy Monograph no. 9. ASA, Madison, Wisconsin. Pages 539-580.
- Ohno, T. et Erich, M. S. 1997.** Inhibitory effects of crop residue-derived organic ligands on phosphate adsorption kinetics. *J. Environ. Qual.* 26: 889–895.
- Parent, L.E., Nduwamungu, C., Allaire, S. et coll. 2007.** Critères biochimiques, chimiques et biologiques de qualité des boues de lisier de porc pour la fabrication d'engrais granulaires. Fiche de transfert 603015 CORPAQ. 4 pages.

- Parton, W.J., Schimel, D.S. Cole, C.V. et Ojima, D.S. 1987.** Analysis of factors controlling soil organic matter levels in Great Plains grassland. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 51:1173-1179.
- Perron, V. et Hébert, M. 2007a.** Caractérisation des boues d'épuration municipales. Partie I : paramètres agronomiques. *Vecteur environnement*. Novembre 2007. Pages 48-52.
- Perron, V. et Hébert, M. 2007b.** Caractérisation des boues d'épuration municipales. Partie II : éléments traces métalliques. *Vecteur environnement*. Novembre 2007. Pages 42-46.
- Placha, I., Venglovsky, J., Lasanda, V. et Plachy, P. 1997.** Survival of *Salmonella typhimurium* in the solid fraction from a farm waste water treatment plant. *Vet. Med. (Praha)* 42:133-137.
- Poirier, V. et Giroux, M. 2004.** Applications d'engrais de ferme et de boues mixtes de papetières en période automnale et printanière : valeur fertilisante et risques environnementaux. *Revue de littérature. IRDA.* 19 pages.
- Prasad, R. et Power, J.F. 1997.** Soil fertility management for sustainable agriculture. CRC/Lewis Publishers. 356 pages.
- Provencher, M. 2003.** Évaluation spatiale de l'efficacité agronomique du LIOR dans la pomme de terre. Thèse de maîtrise, Université Laval. 69 pages.
- Raynal, C. et Nicolardot, B. 2006.** Une meilleure connaissance des engrais et amendements organiques utilisés en bio. *Alter Agri* 79:14-17.
- Ritter, W.F. 2000.** Potential impact of land application of by-products on ground and surface water quality. *Dans* J.F. Power et coll. (eds.) *Land application of agricultural, industrial, and municipal byproducts.* SSSA Book Serie No. 6, Madison, WI. Pages 263-287.
- Robin, D. 1997.** Intérêt de la caractérisation biochimique pour l'évaluation de la proportion de matière organique stable dans le sol et la classification des produits organominéraux. *Agronomie* 17:157-171.
- Rochette, P., van Bochove, E., Prévost, D., Angers, D.A., Côté, D. et Bertrand, N. 2000.** Soil carbon and nitrogen dynamics following application of pig slurry for the 19th consecutive year : II. Nitrous oxides fluxes and mineral nitrogen. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64:1396-1403.
- Rodriguez, F., Guerrero, C., Moral, R., Ayguade, H. et Mataix-Beneyto, J. 2005.** Effects of composted and non-composted solid phase of pig slurry on N, P and K contents in two mediterranean soils. *Com. Soil Sci. Plant An.* 36:635-647.
- Rowe, R.C. 1993.** Potato health management. American Phytopathological Society Press. St-Paul, MN. 178 pages.
- Salomons, W. et Gerritse, R.G. 1981.** Some observations on the occurrence of phosphorus in recent sediments from western Europe. *The Science of the Total Environment* 17:37-49.
- Santamaria, P. 2006.** Nitrate in vegetables: toxicity, content, intake and EC regulation. *J. Sci. Agric.* 86:10-17.
- Santé Canada 2010a.** Le cuivre [en ligne]. Disponible : <http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/pubs/water-eau/copper-cuivre/index-fra.php> [consulté le 29 octobre 2010].
- Santé Canada 2010b.** Santé de l'environnement et du milieu de travail [en ligne]. Disponible : <http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/index-fra.php> [consulté le 29 octobre 2010].
- Satege 2007.** Caractérisation en laboratoire de produits organiques épandus dans le Nord-Pas-de-Calais-Somme. Au travers de cinétiques de minéralisation et de mesure d'indice de stabilité biologique (ISB). Février 2007. 105 pages.
- Seydoux, S., Côté, D., Grenier, M et Comité technique Porc. 2005.** Caractérisation des volumes et des concentrations en éléments fertilisants des déjections animales liquides en Chaudière-Appalaches. Rapport de recherche IRDA. 76 pages.

- Seydoux, S., Côté, D., Grenier, M. et Gasser, M.-O. 2006.** Caractérisation des volumes et des concentrations en éléments fertilisants des effluents d'élevages de poulettes et de poules pondeuses. Rapport de recherche IRDA. 41 pages.
- Shaffer, M. J., Ma, L.W. et Hansen, S. 2001.** Introduction to simulation of carbon and nitrogen dynamics in soils. *Dans* M. J. Shaffer, L.W. Ma et S. Hansen (eds.) Modeling carbon and nitrogen dynamics for soil management. Lewis Publishers, Boca Raton. Pages 1-10.
- Simard, R.R. 2001.** Combined primary/ secondary papermill sludge as a nitrogen source in a cabbage-sweet corn cropping sequence. *Can. J. Soil Sci.* 81:1-10.
- Simard, R., Lafond, J. et Lalande, R. 2000.** Les résidus papetiers : mode d'usage horticole. Colloque sur les biosolides. CPVQ. Pages 47-70.
- Simard, R.R., Coulombe, J., Lalande, R., Gagnon, B. et Yelle, S. 1998.** Use of fresh and composted de-inking sludge in cabbage production. *Dans* S. Brown, J.S. Angle et L. Jacobs (eds.) Beneficial co-utilization of agricultural, municipal and industrial by-products. Kluwer Academic Publishers. Pages 349-361.
- Sissingh, H.A. 1971.** Analytical technique of the PW method used for the assessment of the phosphate status of arabe soils in the Netherlands. *Plant and Soil* 34:483-486.
- Sørensen, P. et Thomsen, I.K. 2005.** Separation of pig slurry and plant utilization and loss of nitrogen-15-labeled slurry nitrogen. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69:1644-1651.
- Statistiques Canada. 2010.** Superficie, production et valeur à la ferme des pommes de terre (mesures métriques), Canada et provinces [en ligne]. Disponible : <http://www.statcan.gc.ca/pub/22-008-x/22-008-x2010002-fra.pdf> [consulté le 29 octobre 2010].
- Tabatabai, M.A. et Bremner, J.M. 1969.** Use of p-nitrophenyl phosphatase for assay of soil phosphatase activity. *Soil Biol. Biochem.* 1:301-307.
- Texier, C. 2001.** Raisonner l'utilisation des déjections porcines de la valorisation agronomique aux traitements. *TechniPorc* 24 (3):31-36.
- Tisdale, S.L., Nelson, W.L., Beaton, J.D. et Havlin, J.L. 1993.** Soil fertility and fertilizers. 5^e édition. Macmillan Publishing Company, New York. 634 pages.
- Torres, M.O. et Vasconcelos, E. 1996.** Effects of solid phase from pig slurry on dry matter accumulation and chemical composition of red clover. *Dans* Proceedings of IX International Colloquium for the Optimization and Plant Nutrition, Czech Republic. Pages 289-295.
- Tran, T.S. et Giroux, M. 1991.** Effects of N rates and harvest dates on the efficiency of ¹⁵N-labelled fertilizer on early harvested potatoes (*Solanum tuberosum* L.). *Can. J. Soil Sci.* 71:519-532.
- Tran, T.S. et Simard, R.R. 1993.** Mehlich III-extractable elements. Chapitre 6. *Dans* M.R. Carter (ed.) Soil sampling and methods of analysis. Canadian Society of Soil Science, Lewis Publishers, Florida. Pages 43-49.
- Tran, T.S., Giroux, M. et N'Dayegamiye, A. 1992.** Utilisation rationnelle des fumures azotées minérales : aspects agronomiques et environnementaux. *Agrosol* 5 (2):18-25.
- Tran, T.S., Côté, D. et N'Dayegamiye, A. 1996.** Effets des apports prolongés de fumier et de lisier sur l'évolution des teneurs du sol en éléments nutritifs majeurs et mineurs. *Agrosol* 9 (1):21-30.
- Tremblay, M.-È. 2008.** Estimation par FT-NIR de la stabilité biologique et de la valeur fertilisante azotée de fumiers. Mémoire de maîtrise. Université Laval. 101 pages.

- Tremblay, M.-È., Nduwagundu, C., Parent, L.-É. et Bolinder, M.A. 2010.** Biological stability of carbon and nitrogen in organic products and crop residues using fourier-transform near-infrared reflectance spectroscopy. *Comm. Soil. Sci. Plant. An.* 41:917-934.
- Unwin, R.J. 1977.** Copper in pig slurry: Some effects and consequences of spreading on grassland. *Dans* MAFF (ed.) *Inorganic pollution in agriculture*. Reference Book no. 326, HMSO, London. Pages 306–319.
- U.S. Environmental Protection Agency. 1996.** SW-846 Manual. Test methods for evaluating solid waste, physical/chemical methods. Method 3050B. Acid digestion of sediments, sludges and soils. Revision 2.
- Van Soest, P.J, Robertson, J.B. et Lewis, B.A. 1991.** Symposium : carbohydrate methodology, metabolism, and nutritional implications in dairy cattle. *J. Dairy Sci.* 74:3583-3597.
- Vasconcelos, E. et Cabral, F. 1996.** Influence of the concentrated pig slurry on soil and corn fodder yield and chemical composition in presence of N top dressing. *Ferti. Research* 45:25-29.
- Vasconcelos, E., Cabral, F. et Cordovil, C.M.d.S. 1997.** Effetes of solid phase from pig slurry on soil chemical characteristics, nitrate leaching, composition, and yield of wheat. *J. Plant Nutr.* 20 (7&8):939-952.
- Vasconcelos, E., Cabral, F. et Cordovil, C.M.d.S. 1999.** Wheat yield and leachability of phosphorus and mineral nitrogen in pig slurry amended Soils. *Com. Soil Sci. Plant An.* 30 (15&16):2245-2257.
- Watabe, M., Rao, J.R., Stewart, T.A., Xu, J., Millar, B.C., Xiao, L., Lowery, C.J., Dooley, J.S. et Moore, J.E. 2003.** Prevalence of bacterial faecal pathogens in separated and unseparated stored pig slurry. *Lett. Appl. Microbiol.* 36:208-212.
- Yasrebi, J., Karimian, N., Maftoun, M., Abtahi, A., Ronaghi, A. et Assad, M.T. 2004.** Laboratory and greenhouse evaluation of ultraviolet light absorption methods of estimating nitrogen supplying capacity of calcareous soils. *Com. Soil Sci. Plant An.* 35 (1&2):219-232.
- Zheng, Z., Simard, R.R., Lafond, J. et Parent, L.-É. 2001.** Changes in phosphorus fractions of a Humic Gleysol as influenced by cropping systems and nutrient sources. *Can. J. Soil Sci.* 81:175-183.