

# Effet des apports d'automne et de printemps de fumiers et de boues mixtes de papetières sur le rendement, la qualité de la pomme de terre et l'efficacité de l'azote

\*M. GIROUX<sup>1</sup>, A. N'DAYEGAMIYE<sup>1</sup> ET R. ROYER<sup>1</sup>

**RÉSUMÉ - M. Giroux, A. N'Dayegamiye et R. Royer, Effet des apports d'automne et de printemps de fumiers et de boues mixtes de papetières sur le rendement, la qualité de la pomme de terre et l'efficacité de l'azote. *Agrosolutions* 18 (1) : 25-34.** Cette étude a déterminé les effets de divers types de fumiers et de boues mixtes de papetières et de leur période d'épandage sur les rendements et la qualité de la pomme de terre, ainsi que sur les coefficients d'efficacité de l'azote. L'essai, réalisé sur un loam de la série Batiscan, était constitué de 18 traitements disposés selon un dispositif en split-plot à quatre répétitions. Deux types de fumiers, frais ou composté, et deux types de boues mixtes de papetières ayant des rapports C/N faible ou moyen ont été appliqués en automne ou au printemps et comparés à une fertilisation minérale azotée (150 kg ha<sup>-1</sup>) et à un témoin sans engrais N. Des traitements combinant les engrais organiques avec une fumure minérale azotée complémentaire (90 kg ha<sup>-1</sup>) étaient également inclus. Les engrais organiques n'ont pas été appliqués lors de la deuxième année d'essai, afin d'évaluer leur arrière-effet. Les applications d'engrais organiques, sans ajout d'engrais minéraux N, ont permis des augmentations significatives de rendements totaux en pomme de terre, variant de 3,57 à 17,18 t ha<sup>-1</sup> et de rendements vendables variant de 2,51 à 16,34 t ha<sup>-1</sup>, en comparaison avec le témoin sans N. Cependant, les rendements les plus élevés ont été obtenus lorsque ces engrais organiques ont été combinés avec une dose complémentaire d'azote minéral de 90 kg N ha<sup>-1</sup>. Les coefficients d'utilisation de l'azote (CUN) obtenus en première année d'application ont varié entre 13,20 et 27,43 % selon les engrais organiques utilisés alors qu'il était de 53,74 % pour la fumure minérale. Les coefficients d'efficacité de l'azote (CEN) ont varié entre 24,56 et 51,05%. Les coefficients d'utilisation et d'efficacité fertilisante de l'azote des engrais les plus faibles ont été obtenus avec les fumiers compostés (C/N 17,9 et 19,8) et avec le fumier frais ayant un rapport C/N élevé (C/N de 29,3). Les coefficients d'utilisation et d'efficacité fertilisante de l'azote des engrais les plus élevés ont été obtenus avec les boues qui présentaient les

plus faibles rapports C /N (8,0 et 11,4). Les CEN et CUN étaient significativement corrélés aux rapports C/N des engrais organiques étudiés ( $R^2 = -0,87$ ). En deuxième année, les CUN ont varié entre 1,5 et 18,4 % et les CEN entre 2,3 et 28,4 %, selon les types d'engrais organiques. Ces coefficients étaient beaucoup plus élevés pour les engrais organiques ayant des rapports C/N relativement élevés (20,4 et 29), en comparaison avec ceux qui présentaient des rapports C/N faibles. En général, la production de pomme de terre et l'efficacité fertilisante de l'azote n'ont pas été significativement différentes entre les périodes d'épandage d'automne ou de printemps. Les résultats obtenus dans cet essai indiquent que les apports de fumiers ou de boues combinés avec une dose de 90 kg N ha<sup>-1</sup> ont permis d'obtenir des rendements élevés de pomme de terre avec une bonne qualité de la récolte. Toutefois, en raison de leur libération d'azote élevée, les engrais organiques avec des rapports C/N faibles peuvent réduire le poids spécifique des tubercules et favoriser la gale ou la rhizoctonie lorsqu'ils sont combinés avec les engrais azotés minéraux. Les apports tardifs à l'automne (23 octobre) de fumiers ou boues mixtes ayant des rapports C/N faibles (< 12) ont légèrement accru les teneurs en nitrates dans le profil du sol (0-60 cm).

**Mots clés :** *fumiers de bovins, boues mixtes de papetières, rapports C/N, période d'épandage, rendement de pomme de terre, coefficient d'efficacité de l'azote, nitrates dans le sol.*

**ABSTRACT - M. Giroux, A. N'Dayegamiye and R. Royer, Spring and fall applications of manure and paper-mill sludge on potato yield, quality and nitrogen efficiency. *Agrosolutions* 18 (1): 25-34.** This study evaluated the effects of different cattle manures and paper-mill sludges applied in fall or in spring on potato yield, specific gravity of tubers, N recoveries for first and in the second year. The experiment was carried on a Batiscan loamy soil and consisted of 18 treatments arranged in a split-plot design with four replications. Two types of manures, composted or not and two

1. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA), 2700 rue Einstein, Québec (Québec), G1P 3W8, Canada

\*Auteur pour la correspondance : téléphone : 418 644-6838, télécopieur : 418 644-6855, courriel : marcel.giroux@irda.qc.ca

types of paper-mill sludges (with low and medium C/N ratios), were applied in fall and in spring. Manures and paper-mill sludges were applied alone or combined with a mineral N fertilizer (90 kg ha<sup>-1</sup>). These treatments were compared to complete mineral N fertilizer (150 kg ha<sup>-1</sup>) and to the control without N. Manures and paper-mill sludges applied alone significantly increased total potato yields from 3.57 to 17.18 t ha<sup>-1</sup> and marketable yields from 2.51 to 16.34 t ha<sup>-1</sup> compared to the control. However, highest potato yields were obtained when these organic amendments were combined with a mineral N fertilizer of 90 kg N ha<sup>-1</sup>, except for paper-mill sludges with low C/N ratio. Potato yields and N recoveries have not been influenced by periods of application. Nitrogen recoveries coefficient (CUN) ranged from 13.20 to 27.43% for organic amendments and was 53.74% for mineral N fertilizer. N efficiency coefficient (CEN) ranged from 24.56 to 51.05%. CEN were significantly related to C/N ratio of organic amendments ( $R^2 = -0,87$ ). Lowest N efficiencies and recoveries were obtained with composted manures (C/N 17.9 and 19.8) and with fresh manure having a high C/N ratio (C/N 29.3). Highest N efficiencies and recoveries were obtained with paper-mill sludges applied in fall or in spring, which presented the lowest C/N ratios (8.0 and 11.4). Fall application (October, 23<sup>th</sup>) of organic amendments with lowest C/N ratio (C/N <12) slightly increased nitrates in soil profile (0-60 cm).

**Key words:** manures, paper-mill sludges, C/N ratio, application period, potato yield, N recoveries, soil nitrates.

## Introduction

Pour combler les déficits des sols agricoles en matière organique et en éléments nutritifs, environ un million de tonnes de boues mixtes de papetières sont intégrées dans les productions agricoles comme fertilisants ou amendements organiques. Les quantités de fumiers et lisiers épandues annuellement s'élèvent à plus de 30 millions de tonnes sur les terres au Québec. Une bonne gestion des fumiers et des boues mixtes se base d'abord sur la caractérisation de ces substances et

sur la connaissance de leur coefficient d'efficacité de l'azote qui dépend de leur composition chimique, notamment de leur rapport C/N, des concentrations en cellulose et lignine et du degré de compostage auquel elles ont été soumises (N'Dayegamiye et al. 2004). Lorsque des engrais organiques présentent des rapports C /N moyens (15-20), on assiste à une immobilisation temporaire de l'azote qui peut réduire leur efficacité fertilisante en première année. Beauchamp (1986) a observé une immobilisation temporaire de l'azote pendant les quatre premières semaines après l'enfouissement de fumier solide (C /N=16), suivie ensuite d'une minéralisation. Par contre, les fumiers frais et les boues mixtes avec des rapports C /N <15 se décomposent rapidement dans les sols, libérant ainsi des quantités élevées d'azote disponible aux plantes cultivées au cours de l'année de leur application (N'Dayegamiye et al. 2001). Chadwick et al. (2000) ont établi que 40 % de la variation du taux de minéralisation de l'azote des fumiers étaient reliés à leur rapport C /N. Les amendements organiques à très faibles teneurs en azote et présentant par conséquent des rapports C/N élevés, produisent une importante immobilisation d'azote, tel que démontré par Fierro et al. (2000) pour les boues primaires de désencrage .

Les coefficients d'efficacité de l'azote des fumiers et des boues mixtes dépendent également des propriétés du sol (texture, structure, pH) qui influencent leur minéralisation (Douglas et Magdoff 1991). Ceux-ci dépendent aussi du type de culture. De récentes recherches (Simard 2001; N'Dayegamiye et al. 2001, Vagstad et al. 2001) ont démontré que l'efficacité fertilisante des boues mixtes était plus élevée pour les cultures ayant une longue période de croissance (maïs, choux, prairie) et plus faible pour celles de courte période (orge). Les engrais organiques se minéralisent pendant toute la saison de végétation; leur minéralisation et la disponibilité de l'azote ne coïncident pas toujours avec le cycle de croissance des cultures. Les céréales peuvent donc préférentiellement bénéficier des arrières-effets des fumiers et des boues mixtes (N'Dayegamiye et al. 2001; Vagstad et al. 2001).

Pour la pomme de terre, Tran et Giroux (1991) ont trouvé que les prélèvements d'azote par le feuillage étaient à leur maximum entre 65 et 75 jours après le semis et que par la suite, cet azote migrait vers les tubercules. La pomme de terre exige beaucoup d'azote tôt en saison mais elle est sensible aux excès d'azote en fin de saison. Les engrais organiques pourraient ainsi retarder la maturité physiologique des plants, réduire le poids spécifique et accroître les sucres réducteurs des tubercules suite à une libération tardive de l'azote. La pomme de terre est également sensible aux apports d'engrais organiques frais et riches en azote en relation avec l'incidence de la gale commune (Atlantic Canada Potato Committee, 1981). Par contre, Simard et al. (1998) ont trouvé que les boues mixtes de papetières compostées, appliquées à la dose de 40 t ha<sup>-1</sup>, avaient un effet bénéfique sur les rendements en pomme de terre et réduisaient aussi l'incidence de la gale dans les sols sableux faiblement pourvus en matière organique.

Il a aussi été démontré que l'efficacité fertilisante de l'azote dépend de la teneur en cet élément de l'amendement ou engrais apporté (N'Dayegamiye et al. 2004; Palm et Sanchez, 1981). Une relation entre l'efficacité fertilisante et le rapport N-NH<sub>4</sub>/N total a été démontrée pour les lisiers de porc (Giroux et al. 2000). Cependant, les boues de papetières, à la sortie de l'usine, ont un très faible rapport N-NH<sub>4</sub>/N-total mais présentent un coefficient d'efficacité de l'azote relativement élevé. On ne peut pas se fier à ce rapport pour connaître l'efficacité fertilisante de l'azote des boues mixtes de papetières.

Comme pour l'efficacité fertilisante, les pertes de nitrates peuvent également être associées à la composition des engrais organiques et à leur période respective d'épandage. Les fumiers riches en azote et ayant un rapport C/N < 15 peuvent rapidement libérer de l'azote dans le sol, qui peut être perdu par lessivage lors des applications en post-récolte à l'automne. Par contre, des fumiers et des boues mixtes avec un rapport C/N >20 libèrent graduellement l'azote dans le sol et présentent ainsi un risque plus faible de perte de nitrates (N'Dayegamiye et al. 2004). Ce risque peut être atténué par la présence de cultures de couverture ou de résidus de cultures laissés au sol.

Les arrières-effets des engrais organiques (fumiers et boues mixtes de papetières) sont encore peu connus pour la culture de la pomme de terre. Ceux-ci pourraient être très variables selon les caractéristiques de ces substances. Les engrais organiques ayant les coefficients d'efficacité de l'azote les plus élevés en première année ont souvent des arrières-effets assez faibles. C'est le cas par exemple des lisiers de porc qui montrent des coefficients d'arrière-effet N de 7 % (CRAAQ 2003) alors que les fumiers et les boues avec des rapports C/N modérés (15 à 20) donnent des arrières-effets de l'azote plus importants (N'Dayegamiye et al. 2004).

## Dispositif expérimental

Cette étude était constituée de 18 traitements disposés selon un dispositif en split-plot à quatre répétitions. En première année, deux types de fumier frais et compostés et deux types de boues mixtes de papetières ayant des rapports C/N faibles ou moyens ont été appliqués à l'automne ou au printemps et comparés à une fertilisation minérale azotée (150 kg ha<sup>-1</sup>) et à un témoin sans engrais N. Des traitements combinant les engrais organiques avec une fumure minérale azotée complémentaire (90 kg ha<sup>-1</sup>) étaient également inclus. Lors

les teneurs en matière organique et en azote total étaient respectivement de 4,23 % et 0,203 % (tableau 1). Le sol était riche en P, K, Ca et Mg.

Les fumiers et les boues mixtes ont été appliqués le 23 octobre 2003 ou le 20 mai 2004 avec un épandeur à fumier conventionnel. Les engrais organiques ont ensuite été incorporés avec un vibroculteur dans la couche superficielle du sol (0-10 cm). La détermination précise des doses a été faite en plaçant quatre quadrats de 0,9 m<sup>2</sup> dans les parcelles et en pesant les quantités d'engrais organiques qui se déposaient dans ces quadrats.

Les engrais organiques étudiés présentaient des teneurs très variables en N total (3,82 à 8,49 kg N t<sup>-1</sup>), en P (0,79 à 4,38 kg P t<sup>-1</sup>) et en matière organique (80,1 à 92,0 %) (tableau 2). Le carbone a été déterminé à partir de la matière organique mesurée par perte au feu en considérant un facteur de 2 : C = (MO/2). Les rapports C/N ont varié entre 8,0 et 29,3. Ces engrais organiques contenaient également des teneurs variables en N ammoniacal (N-NH<sub>4</sub>), qui représentaient en moyenne entre 3,3 et 27,9 % de l'azote total, selon les types d'engrais organiques. Les boues mixtes contenaient de faibles quantités d'azote ammoniacal et de potassium, en comparaison avec les fumiers.

Pendant les deux années d'étude, l'engrais azoté (27-0-0) a été appliqué seulement dans les traitements avec fertilisation minérale

**Tableau 1. Propriétés du sol étudié (série Batiscan).**

Type de sol	Profondeur (cm)	pH (H <sub>2</sub> O)	M.O. ---%---	N total	P	K	Ca	Mg	Al (mg/kg)	P/Al (%)
Loam	0-20	6,5	4,2	0,203	381	274	3 945	121	1354	11,26
Loam	20-40	6,4	3,00	0,143	185	226	2683	105	1446	5,12
loam	40-60	6,3	0,6	0,065	94	189	2535	198	1110	3,39

Cette étude avait pour objectifs de déterminer les effets d'apports de divers types de fumiers et de boues mixtes de papetières appliqués en automne ou au printemps sur les rendements, les coefficients d'efficacité de l'azote, le poids spécifique des tubercules, et sur l'incidence de la rhizoctonie et de la gale de la pomme de terre. De même, leurs arrières-effets sur les rendements de pomme de terre et les coefficients d'efficacité d'azote ont été évalués en deuxième année.

de la deuxième année, les engrais organiques n'ont pas été appliqués afin d'évaluer leurs arrières-effets.

Les essais ont été effectués à la station de recherche du CRSAD à Deschambault, avec la pomme de terre cv Norland en première année et cv. Chieftain en deuxième année pour le suivi des arrières-effets. Le type de sol était un loam de la série Batiscan. Dans la couche arable (0-20 cm), les valeurs de pH étaient de 6,5, tandis que

**Tableau 2. Caractéristiques des engrais organiques étudiés.**

Types d'engrais organiques	Périodes des apports	Base humide					Matière sèche (---%---	M.O.	Rapport C/N
		N total	N-NH <sub>4</sub>	N-NH <sub>4</sub> /Ntot	P	K			
		---(kg/t)---	%	%	---(kg/t)---	---			
Boue de papetières 1	Automne 2003	7,92	0,26	3,28	1,37	0,62	14,4	88,0	8,0
Boue de papetières 2		5,10	0,30	5,88	0,89	0,45	22,9	92,0	20,6
Fumier de veaux		5,26	0,45	8,56	3,06	7,38	38,6	79,8	29,3
Fumier composté de bovins de boucherie		8,49	1,56	18,37	4,38	10,42	37,7	80,5	17,9
Boue de papetières 3	Printemps 2004	5,71	0,44	7,71	0,86	0,38	15,1	86,4	11,4
Boue de papetières 4		5,34	0,76	14,23	0,79	0,41	25,1	87,8	20,6
Fumier de bovins de boucherie		5,73	1,60	27,9	1,32	5,04	26,1	89,4	20,4
Fumier composté de bovins de boucherie		3,82	0,60	15,71	0,83	4,63	18,9	80,1	19,8

(150 kg N ha<sup>-1</sup>) ou en complément à dose réduite (90 kg N ha<sup>-1</sup>) aux fumiers et aux boues mixtes. Les engrais minéraux P et K ont été appliqués dans toutes les parcelles sous forme de superphosphate et de chlorure de potassium respectivement à la dose 75 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> et 75 kg K<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup>.

La pomme de terre a été semée la dernière semaine de mai en 2004 et 2005 à un taux de 45 000 plants ha<sup>-1</sup> en rangs espacés de 100 cm. Chaque traitement comportait quatre rangs de 10 m. La récolte des parcelles a été effectuée sur les deux rangs centraux et pesée. Un échantillon de 4 kg a par la suite été prélevé en vue de la détermination de la matière sèche, de la concentration en azote total des tubercules, du poids spécifique, de l'incidence de la gale commune et de la rhizoctonie.

Pour établir l'indice de rhizoctonie et de gale commune, un échantillon de 20 tubercules a été prélevé dans chaque traitement. Chaque tubercule a été classé selon des caractéristiques visuels : classe 1 (tubercule sain, absence de symptôme), classe 2 (avec environ 1% de la superficie couverte), classe 3 (avec environ 5 % de la superficie couverte) et classe 4 (avec environ 10% de superficie couverte). Un indice pondéré a été ensuite établi en multipliant le nombre de tubercules de chaque classe par 0 (sain), par 1 (classe 1 %), par 2 (classe 5 %) et par 3 (classe 10 %). Un cumul des indices de chaque classe était effectué, constituant ainsi l'indice de gale ou de rhizoctonie.

Le calcul des coefficients d'utilisation de N (CUN) a été effectué selon la méthode des différences entre les prélèvements en azote obtenus dans les traitements avec les engrais minéraux N et les engrais organiques et ceux mesurés dans le témoin, divisé par la quantité totale de l'azote apporté au sol en provenance des fumiers, des boues mixtes ou de l'engrais N. Ces coefficients ont été mesurés lors de la première année, suite à l'application des engrais minéraux N et organiques, et en deuxième année comme indicateur de l'effet résiduel des apports de l'année précédente.

Les coefficients d'efficacité de N (en équivalence avec l'engrais N) ont été établis selon le rapport des coefficients d'utilisation de N des engrais organiques, sur les coefficients d'utilisation des engrais minéraux.

$$CUN = \frac{\text{Prél. N avec engrais org. ou minéral} - \text{Prél. N témoin}}{\text{Quantité N apporté par les engrais organiques ou minéraux}} \times 100$$

$$CEN = \left( \frac{CUN \text{ engrais organiques}}{CUN \text{ engrais minéral}} \right) \times 100$$

Des échantillons de sol ont été prélevés par couche de 20 cm sur une profondeur de 60 cm à différentes périodes, après les épandages d'engrais à l'automne ou au printemps de l'année suivante, en cours de saison de croissance et après la récolte de la pomme de terre afin de connaître l'influence des engrais et des périodes d'épandage sur l'accumulation de nitrates et d'ammonium dans le profil du sol.

## Résultats et discussion

### Rendements en pomme de terre et prélèvements en N

Les rendements totaux en pomme de terre ont été très élevés en 2004, variant de 31,61 à 55,45 t ha<sup>-1</sup> selon les traitements (tableau 3). Les rendements vendables ont

varié pour leur part de 22,74 à 46,97 t ha<sup>-1</sup>. Les applications de fumiers et de boues mixtes, sans ajout d'engrais minéral azoté, ont permis des augmentations significatives de rendements totaux, variant de 3,57 à 17,18 t ha<sup>-1</sup>, ce qui représente des augmentations de 11,3 à 54,3 % en comparaison avec le témoin sans engrais azoté. Pour les rendements vendables, les applications de fumiers et de boues mixtes, sans ajout d'engrais minéral azoté, ont permis des augmentations significatives de production de pomme de terre, variant de 2,51 à 16,34 t ha<sup>-1</sup>, ce qui représente de 11,0 à 71,9 % d'augmentation en comparaison avec le témoin sans engrais azoté, ni engrais organique. Cependant, les rendements totaux et vendables les plus élevés ont été obtenus lorsque les apports de fumiers et de boues mixtes ont été combinés avec une dose d'azote minéral complémentaire de 90 kg N ha<sup>-1</sup>. Les rendements de pomme de terre obtenus dans les traitements combinant les engrais organiques et un complément d'engrais N minéral (90 kg N ha<sup>-1</sup>) étaient souvent supérieurs à ceux mesurés dans les

**Tableau 3. Rendements totaux et vendables de pomme de terre selon les divers modes de fertilisation.**

Types d'engrais organiques	Périodes des apports	Engrais organique ou N minéral seul t/ha		Engrais organique + N minéral t/ha	
		Rend. total	Rend. vendable	Rend. total	Rend. vendable
Boue de papetières 1	Automne 2003	48,79	39,08	48,75	39,55
Boue de papetières 2		41,07	34,61	52,35	43,00
Fumier de veaux		35,18	27,17	54,63	46,24
Fumier composté de bovins		38,34	25,25	54,38	44,74
Boue de papetières 3	Printemps 2004	43,11	35,33	44,41	36,59
Boue de papetières 4		41,10	34,71	48,84	41,25
Fumier de bovins de boucherie		41,66	32,66	54,83	46,97
Fumier composté de bovins		39,52	28,64	55,45	46,73
Témoin sans N		31,61	22,74	--	--
Fumure N minérale		47,30	38,40	--	--
Probabilité > F		Rend. total	Rend. vendable		
Types d'engrais organiques		0,0164	0,0142		
Apport complémentaire N		<0,0001	<0,0001		
Interaction		<0,0001	<0,0001		

parcelles fertilisées uniquement avec une fumure N minérale (150 kg N ha<sup>-1</sup>). Les rendements totaux et vendables n'ont pas été significativement différents entre les périodes d'épandage d'automne ou de printemps, mais l'ont été entre les types d'engrais organiques pour les rendements totaux (P=0,0164) et vendables (P=0,0142).

En deuxième année de l'étude les arrières-effets des apports des engrais organiques sur les rendements et les prélèvements en azote de la pomme de terre, ont été déterminés. Les résultats indiquent qu'il n'y avait pas de différence significative entre les engrais organiques. Les apports antérieurs d'engrais organiques ont produit des rendements totaux et vendables plus élevés que le traitement témoin sans azote (tableau 4). Ceci démontre que les arrières-effets de la plupart des engrais organiques sont importants en deuxième année sur la production de la pomme de terre. Les apports de boues de papetières 1 et 3 présentant un faible rapport C/N, avaient montré en première année un effet très marqué sur la production de pomme de terre. En deuxième année, ces traitements se sont traduits par des rendements similaires à ceux obtenus pour le témoin sans engrais minéral N ou organique. Les faibles rapports C/N de ces boues indiquent que la matière organique est très labile et qu'elles se sont vraisemblablement fortement décomposées la première année, produisant des arrières-effets négligeables en deuxième année. Pour tous les types d'engrais organiques, un apport complémentaire d'azote minéral était cependant requis à raison de 90 kg N ha<sup>-1</sup>, afin d'obtenir des rendements élevés en pomme de terre, équivalents à ceux obtenus avec l'engrais minéral N (150 kg N ha<sup>-1</sup>). Cet apport complémentaire devrait toutefois se faire en fonction de l'importance des arrières-effets des engrais sur les rendements; les engrais organiques aux rapports C/N plus faibles et donc avec un faible arrière-effet nécessitant plus d'azote minéral.

## Qualité de la récolte

Afin de mesurer la qualité de la récolte, le poids spécifique et la matière sèche des tubercules ont été déterminés ainsi que les indices de gale et de rhizoctonie (tableaux

5 à 7). Les apports d'engrais organiques seuls ont généralement montré de faibles poids spécifiques variant de 1,070 à 1,072, comparables à ceux de la parcelle témoin sans azote (1,071) mais significativement plus faibles que le traitement avec fumure

**Tableau 4. Arrières-effets en 2005 des engrais organiques appliqués à l'automne 2003 et au printemps 2004 sur les rendements totaux et vendables de pomme de terre**

Types d'engrais organiques	Périodes des apports	Engrais organique ou N minéral seul t/ha		Engrais organique + N minéral t/ha	
		Rend. total	Rend. vendable	Rend. total	Rend. vendable
Boue de papetières 1	Automne 2003	41,02	38,92	56,69	53,2
Boue de papetières 2		44,09	41,45	62,50	59,59
Fumier de bovins de veaux		43,04	40,81	60,19	56,79
Fumier composté de bovins		43,67	41,83	63,35	59,36
Boue de papetières 3	Printemps 2004	41,04	38,92	59,21	56,20
Boue de papetières 4		44,76	42,89	55,93	53,10
Fumier de bovins de boucherie		45,39	43,23	64,20	61,00
Fumier composté de bovins		43,12	41,45	61,62	58,94
Témoin sans N		40,80	38,52	--	--
Fumure N minérale (appliqué en 2005)		62,04	57,71	--	--
Probabilité > F		Rend.total	Rend. vendable		
Types d'engrais organiques		0,3529	0,3610		
Apport complémentaire N		<0,0001	<0,0001		
Interaction		0,4845	0,5935		

**Tableau 5. Poids spécifique et teneur en matière sèche de la pomme de terre selon les divers modes de fertilisation (première année).**

Types d'engrais organiques	Périodes des apports	Engrais organique ou N minéral seul		Engrais organique + N minéral	
		Poids spécifique	Matière sèche %	Poids spécifique	Matière sèche %
Boue de papetières 1	Automne 2003	1,070	19,8	1,070	19,8
Boue de papetières 2		1,072	19,3	1,071	20,5
Fumier de veaux		1,071	19,2	1,073	19,7
Fumier composté de bovins		1,070	19,3	1,073	19,7
Boue de papetières 3	Printemps 2004	1,071	19,8	1,068	19,2
Boue de papetières 4		1,072	19,2	1,073	20,3
Fumier de bovins de boucherie		1,071	20,0	1,072	19,8
Fumier composté de bovins		1,070	19,3	1,073	20,2
Témoin sans N		1,071	19,8	--	--
Fumure N minérale		1,074	19,2	--	--
Probabilité > F		Poids spécifique	Matière sèche		
Types d'engrais organiques		0,0183	0,8883		
Apport complémentaire N		0,0430	0,1036		
Interaction		0,0847	0,1468		

**Tableau 6. Poids spécifique et teneur en matière sèche de la pomme de terre selon les apports antérieurs d'engrais N minéral et organiques (arrière-effets).**

Types d'engrais organiques	Périodes des apports	Engrais organique ou N minéral seul		Engrais organique + N minéral	
		Poids spécifique	Matière sèche %	Poids spécifique	Matière sèche %
Boue de papetières 1	Automne 2003	1,079	19,85	1,075	21,24
Boue de papetières 2		1,079	20,52	1,079	20,54
Fumier de veaux		1,078	21,11	1,078	20,68
Fumier composté de bovins		1,078	20,75	1,078	20,00
Boue de papetières 3	Printemps 2004	1,077	20,18	1,076	20,94
Boue de papetières 4		1,081	21,08	1,078	20,65
Fumier de bovins de boucherie		1,080	20,75	1,078	20,28
Fumier composté de bovins		1,079	20,98	1,078	20,50
Témoin sans N		1,080	20,61	--	--
Fumure N minérale		1,078	20,56	--	--
Probabilité > F		Poids spécifique	Matière sèche		
Types d'engrais organiques		0,1398	0,9816		
Apport complémentaire N		0,0009	0,8030		
Interaction		0,4256	0,2665		

**Tableau 7. Indice de gale et de rhizoctonie sur les tubercules de la pomme de terre selon les divers modes de fertilisation en 2004.**

Types d'engrais organiques	Périodes des apports	Engrais organique ou N minéral seul		Engrais organique + N minéral	
		Indice de gale	Indice de rhizoctonie	Indice de gale	Indice de rhizoctonie
Boue de papetières 1	Automne 2003	1,50	1,50	2,50	3,75
Boue de papetières 2		1,00	1,25	0,75	2,50
Fumier de bovins de veaux		0,00	2,50	1,50	2,50
Fumier composté de bovins		0,25	2,00	1,50	3,50
Boue de papetières 3	Printemps 2004	0,75	1,50	1,25	4,25
Boue de papetières 4		1,00	0,75	2,00	2,25
Fumier de bovins de boucherie		1,00	0,75	0,50	1,00
Fumier composté de bovins		0,25	2,00	0,25	1,50
Témoin sans N		0,00	3,00	--	--
Fumure N minérale		1,50	4,50	--	--
Probabilité > F					
Types d'engrais organiques		0,1348	0,2092		
Apport complémentaire N		0,0136	0,0192		
Interaction		0,4538	0,7936		

minérale seule (1,074) (tableau 5). L'ajout d'un complément d'azote minéral a significativement augmenté le poids spécifique des tubercules. Par exemple, les applications de fumiers de bovins compostés ont produit des pommes de terre ayant un poids spécifique de 1,070 sans supplément de N minéral et de 1,073 avec ajout d'engrais azoté. À l'inverse, la boue de papetières 3

avec un faible rapport C/N a produit des pommes de terre avec un poids spécifique de 1,071 lorsqu'elle était appliquée seule et de 1,068 lorsque appliquée avec un complément d'azote minéral. Ces résultats indiquent que les compléments d'azote minéral devraient être ajustés selon la nature des engrais organiques, en considérant leur vitesse de libération d'azote. Les engrais

organiques utilisés à trop fortes doses ou avec une dose complémentaire d'azote élevée pourraient ainsi comporter un risque en rapport avec la maturité des tubercules, ce qui peut se traduire par un faible poids spécifique. Les engrais organiques appliqués directement sur une culture de pomme de terre devraient viser à combler une faible proportion des besoins en azote (30% et moins) et ne pas être appliqués directement sur la pomme de terre destinée à la transformation, plus sensible à la libération tardive d'azote et au manque de maturité des tubercules. Il y a un risque élevé que les engrais organiques appliqués l'année de production de la pomme de terre en réduisent le poids spécifique et en affectent la maturité. Les apports d'engrais organiques n'ont pas influencé la teneur matière sèche des tubercules, en comparaison avec les apports de fumure minérale ou dans le cas du témoin sans engrais (tableaux 5 et 6).

En deuxième année de suivi des arrière-effets, des apports d'engrais organiques, il n'y a pas eu de différence significative entre le poids spécifique des tubercules en fonction des divers engrais organiques ( $P=0,1398$ ) (tableau 6). Par contre, l'apport complémentaire d'azote minéral à raison de  $90 \text{ kg N ha}^{-1}$  a réduit significativement le poids spécifique ( $P=0,0009$ ). Ces résultats montrent que l'effet résiduel des engrais organiques est important et qu'il faut réduire la dose de l'engrais N pour assurer l'obtention d'une récolte de qualité.

### Incidence des engrais sur l'indice de gale et de rhizoctonie

En première année d'apports d'engrais minéral N et organiques, l'incidence de la gale a été faible et non significative en ce qui concerne l'effet des engrais organiques ( $P=0,1348$ ) (tableau 7). Les engrais organiques appliqués seuls ont fourni un indice de gale similaire à celui qui était obtenu avec la fumure minérale seule. Le complément d'azote apporté a produit un effet significatif sur l'indice de gale ( $P=0,0136$ ) mais l'indice demeure faible. Ceci démontre qu'une attention particulière doit être accordée à l'ajustement de la fumure azotée minérale complémentaire lorsque des engrais organiques sont appliqués. En 2005, lors de la mesure des arrière-effets avec le cultivar Chieftain,

**Tableau 8. Arrière-effets des engrais azotés sur l'indice de gale des tubercules en 2005 selon les engrais appliqués à l'automne 2003 et au printemps 2004.**

Types d'engrais organiques	Périodes des apports	Engrais organique ou N minéral seul	Engrais organique + N minéral
		Indice de gale	Indice de gale
Boue de papetières 1	Automne 2003	33,8	32,0
Boue de papetières 2		25,8	23,0
Fumier de veaux		27,5	28,0
Fumier composté de bovins		26,5	29,3
Boue de papetières 3	Printemps 2004	22,0	26,3
Boue de papetières 4		22,8	27,0
Fumier de bovins de boucherie		30,3	27,3
Fumier composté de bovins		25,0	24,8
Témoin sans N		31,3	--
Fumure N minérale		26,0	--
Probabilité > F		Indice de gale	
Types d'engrais organiques		0,3321	
Apport complémentaire N		0,8714	
Interaction		0,1322	

**Tableau 9. Prélèvements en N, coefficients d'utilisation et d'efficacité de l'azote selon les types d'engrais et les périodes d'épandage.**

Types d'engrais organiques	Périodes des apports	Doses appliquées	Prélèvements	C.U.N. <sup>1</sup>	C.E.N. <sup>2</sup>
		(kg N/ha)		%	
Boue de papetières 1	Automne 2001	293	155	27,43	51,05
Boue de papetières 2		148	109	23,48	43,70
Fumier de veaux		89	90	17,50	32,57
Fumier composté de bovins		136	96	16,13	30,02
Témoin sans N	Printemps 2002	0	74	--	--
Fumure minérale		150	155	53,74	100,00
Boue de papetières 3		177	121	26,39	49,11
Boue de papetières 4		149	108	22,91	42,64
Fumier de bovins de boucherie		120	104	19,57	36,43
Fumier composté de bovins		172	97	13,20	24,56

<sup>1</sup> coefficient d'utilisation de l'azote des engrais en première année

<sup>2</sup> coefficient d'efficacité de l'azote des engrais en première année

l'indice de gale a été globalement beaucoup plus élevé, se situant entre 22,0 et 33,8 (tableau 8). Plusieurs tubercules sont couverts à près de 10 % de leur surface. Cependant, ni les engrais organiques résiduels ( $P=0,3321$ ) ni la fumure N complémentaire ( $P=0,8714$ ) n'ont montré un effet significatif.

En ce qui concerne l'indice de rhizoctonie en 2004, les engrais organiques n'ont pas eu d'effet significatif ( $P=0,2092$ ) mais le complément d'azote minéral a eu un effet significatif ( $P=0,0192$ ) (tableau 7). Les boues mixtes de papetières à faible rapport C/N complémentés d'azote montrent des indices de rhizoctonie légèrement plus élevés (3,75 et 4,25). L'ajout d'un complément en fumure minérale azotée pourrait

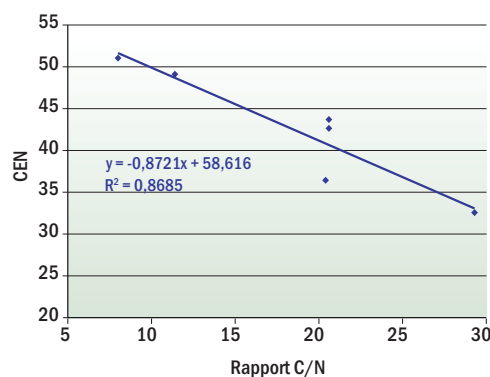
aggraver l'incidence de la rhizoctonie d'où l'importance de bien évaluer les doses exactes d'azote complémentaire à apporter. En 2005, la présence de rhizoctonie était très faible voire inexistante et aucune mesure de l'indice n'a été effectuée.

### Coefficients d'utilisation et d'efficacité d'azote

Les coefficients d'utilisation de N (CUN) ont varié entre 13,20 et 27,43 % selon les engrais organiques appliqués tandis que celui de la fumure N minérale a été de 53,74 % (tableau 9). Les boues à faible rapport C/N montrent les CUN les plus élevés (26,39 et 27,43 %) alors que les boues mixtes avec un rapport C/N supérieur montrent un CUN plus faible (22,91 et

23,48 %) (tableau 9). Les fumiers compostés ont des CUN plus faibles avec 13,20 et 16,13 %. Les fumiers non compostés ont des CUN relativement faibles de l'ordre de 17,50 à 19,57 %. Ces fumiers frais avaient des rapports C/N supérieurs à 20, ce qui peut expliquer la faible utilisation de l'azote. Le niveau de compostage des engrais organiques et leur rapport C/N sont deux facteurs importants à considérer pour évaluer la valeur fertilisante des engrais.

Les coefficients d'efficacité de N (CEN) des engrais ont varié entre 24,56 et 51,05 % selon les engrais organiques appliqués (tableau 9). Les boues à faible rapport C/N montrent les CEN les plus élevés (49,11 et 51,05%) alors que les boues mixtes avec un rapport C/N plus grand montrent un CEN plus faible avec 42,64 et 43,70 % (tableau 9). Les fumiers compostés ont des CEN plus faibles avec 24,56 et 30,02 %. Les fumiers non compostés ont des CUN relativement faibles de 32,57 et 36,43 %. Le rapport C/N relativement élevé de ces fumiers (20,4 et 29,3) peut expliquer leur faible CEN. La figure 1 présente la relation entre le coefficient d'efficacité de l'azote et le rapport C/N des six engrais organiques non compostés appliqués sur la pomme de terre. La relation démontre bien la diminution du CEN avec l'accroissement du rapport C/N. La pente de cette régression montre une diminution du CEN de 0,87 % pour chaque augmentation d'une unité du rapport C/N des engrais organiques non compostés. Le CEN des fumiers compostés ne peut être expliqué par cette régression et ces engrais ont un comportement totalement différent relativement à leur valeur fertilisante.



**Figure 1. Relation entre le coefficient d'efficacité de l'azote (CEN) de première année des boues de papetières et des fumiers frais de bovins selon leur rapport C/N.**

**Tableau 10. Arrière-effets en 2005 des engrais organiques appliqués en 2003 et 2004 sur les coefficients d'utilisation et d'efficacité de l'azote selon les types.**

Types d'engrais organiques	Périodes des apports	Doses appliquées	Prélèvements	C.U.N. <sup>1</sup>	C.E.N. <sup>2</sup>
		(kg N/ha)		%	
Boue de papetières 1	Automne 2003	293	97	3,85	5,93
Boue de papetières 2		148	98	8,76	13,51
Fumier de veaux		89	102	18,42	28,40
Fumier composté de bovins		136	91	4,21	6,48
Témoin sans N	Printemps 2004	0	85	--	--
Fumure minérale en 2005		150	183	64,87	100,00
Boue de papetières 3		177	101	9,00	13,87
Boue de papetières 4		149	101	10,77	16,60
Fumier de bovins de boucherie		120	100	12,41	19,14
Fumier composté de bovins		172	88	1,47	2,26

<sup>1</sup> coefficient d'utilisation de l'azote des engrais en 2e année

<sup>2</sup> coefficient d'efficacité de l'azote des engrais en 2e année

En ce qui concerne les arrières-effets de deuxième année des engrais organiques sur les coefficients d'utilisation de l'azote, les boues de papetières ayant un faible rapport C/N fournissent en deuxième année des CUN plus faibles (3,85 et 9,00 %) comparativement aux autres boues (8,76 et 10,77 %) avec un rapport C/N plus élevé (tableau 10). Il semble que les arrières-effets de l'azote des boues soient plus élevés pour les boues avec un rapport C/N élevé, ce qui est l'inverse des effets de première année. Les fumiers compostés fournissent en deuxième année les plus faibles CUN (1,47 et 4,21 %). Les fumiers frais de bovins fournissent par contre des CUN relativement importants (12,41 et 18,42 %) en deuxième année. Le rapport C/N relativement élevé (20,4 et 29,3) de ces fumiers frais réduit l'effet de première année mais la valeur fertilisante se manifeste encore en deuxième année.

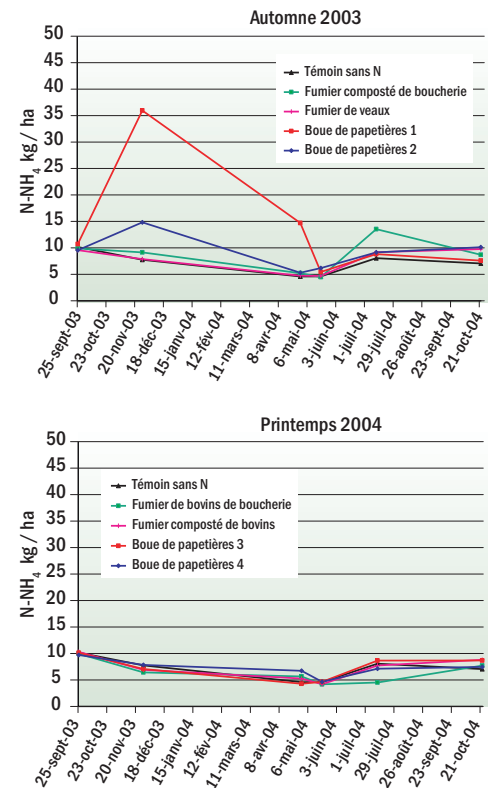
Les arrières-effets des engrais organiques sur les coefficients d'efficacité de l'azote (CEN) sont tout à fait semblables à ce qui a été observé pour les CUN (tableau 10). Les boues de papetières avec un faible rapport C/N fournissent en deuxième année des CEN plus faibles (5,93 et 13,87 %) comparativement aux autres boues (13,51 et 16,60 %) avec un rapport C/N plus élevé. Il semble que les arrières-effets de l'azote des boues soient plus élevés pour celles ayant un rapport C/N plus élevé, ce qui est l'inverse des effets de première année. Les fumiers compostés fournissent les plus faibles CEN (1,47 et 4,21 %) en deuxième

année. Les fumiers frais de bovins fournissent par contre des CEN relativement importants (19,14 et 28,40 %) en deuxième année. Le rapport C/N relativement élevé pour ces fumiers frais réduit l'effet de première année mais prolonge l'effet de l'efficacité fertilisante en deuxième année.

Les résultats obtenus dans cet essai démontrent que les apports de fumiers et de boues mixtes de papetières ont accru les rendements et la qualité de la pomme de terre. De récentes recherches (Simard 2001; N'Dayegamiye et al. 2001, N'Dayegamiye et al. 2004) ont également démontré des réponses significatives avec d'autres cultures ayant une longue période de croissance (maïs, chou, prairie) aux applications de boues mixtes de papetières. Toutefois, des apports d'engrais organiques à doses élevées ou complémentées de doses élevées de N peuvent réduire le poids spécifique des tubercules et induire l'incidence de gale. Il est ainsi nécessaire d'ajuster la fertilisation azotée suite aux apports de boues mixtes sur la culture de la pomme de terre. Les coefficients d'utilisation d'azote obtenus pour la pomme de terre étaient élevés et similaires à ceux qui ont été mesurés pour le maïs-ensilage dans les mêmes conditions de sol et de climat (N'Dayegamiye et al. 2004) et pour le maïs-grain à d'autres sites expérimentaux (N'Dayegamiye et al. 2001).

## Azote ammoniacal et nitrique dans le profil du sol

Lorsque les engrais organiques minéralisent tardivement, sans aucune culture pour absorber l'azote en post-récolte, on peut assister à une accumulation d'azote ammoniacal ou nitrique dans le profil de sol. Les apports d'automne de fumiers et de boues mixtes de papetières ont été faits le 23 octobre 2003. Dans le cas de la boue de papetière avec un rapport C/N de 8,0, une accumulation importante de 36 kg N- NH<sub>4</sub> ha<sup>-1</sup> a été mesurée dans la couche de sol 0-60 cm un mois après les épandages (figure 2). L'apport tardif des engrais a produit une ammonification de l'azote mais a ralenti la nitrification, ce qui peut expliquer cette accumulation de N-NH<sub>4</sub>. L'autre boue de papetières avec un rapport C/N de 20,6 a également accru la teneur en N-NH<sub>4</sub> du sol par rapport à celle de la parcelle témoin sans apport, mais à un niveau beaucoup moindre. Les fumiers, frais ou composté, n'ont pas produit une accumulation de N-NH<sub>4</sub> significativement différente de celle de la parcelle témoin sans engrais. Au printemps 2004, les engrais organiques ont



**Figure 2. Quantité d'azote ammoniacal (N-NH<sub>4</sub>) dans la couche de sol 0-60 cm suite aux apports d'engrais organiques effectués à l'automne 2003 et au printemps 2004.**

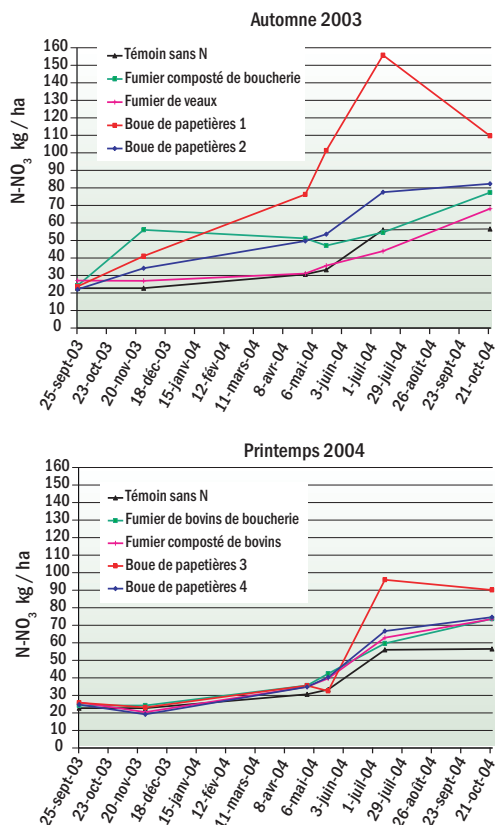


Figure 3. Quantité de nitrates ( $\text{N-NO}_3$ ) dans la couche de sol 0-60 cm suite aux apports d'engrais organiques effectués à l'automne 2003 et au printemps 2004.

été appliqués le 20 mai. Le niveau des teneurs en  $\text{N-NH}_4$  est demeuré faible suite aux apports et aucune différence par rapport à la parcelle témoin sans engrais n'a été mesurée. Les conditions de température favorable à la nitrification n'ont pas permis à l'azote ammoniacal de s'accumuler dans les sols au printemps, contrairement à ce qui a été observé dans certains cas pour les apports tardifs d'automne.

Les teneurs en nitrates se sont accrues modérément en novembre après l'épandage des engrais organiques en octobre par rapport au niveau mesuré dans la parcelle témoin sans engrais. De façon générale, les teneurs en nitrates, mesurées dans la couche 0-60 cm de sol en automne, sont demeurées relativement faibles, inférieures à  $60 \text{ kg N-NO}_3 \text{ ha}^{-1}$ . Au mois de juillet 2004, un pic de nitrates correspondant à une période de minéralisation des engrais a été mesuré pour certains engrais. Il est particulièrement important pour la boue de papetières avec un faible rapport C/N et à un niveau moindre pour l'autre boue avec un rapport C/N plus élevé. Les fumiers, compostés ou non, n'ont pas montré d'accumulation importante de nitrates en juillet. La même tendance est observée pour les engrais organiques appliqués en mai 2004. Les teneurs en nitrates dans les sols en juillet peuvent aider à expliquer les valeurs des coefficients d'utilisation et d'efficacité de l'azote des engrais. Si la libération de l'azote est plus élevée en cours de saison, l'utilisation de l'azote par la plante sera plus grande. À l'automne 2004, après la récolte des pommes de terre, les boues avec un faible rapport C/N ont laissé des teneurs importantes de nitrates dans les sols variant de 90 à  $110 \text{ kg N-NO}_3 \text{ ha}^{-1}$ . Ceci démontre que la forte libération de l'azote des boues à faible rapport C/N en fin de saison peut provoquer des accumulations de nitrates dans les sols, en plus de nuire à la qualité et à la maturité de la pomme de terre d'où l'importance de bien équilibrer les sources de N lors des apports.

Les accumulations de nitrates dans le sol après la récolte de la pomme de terre ont été fortement reliées aux rapports C/N des engrais organiques ( $R^2=0,80$ ) et à la quan-

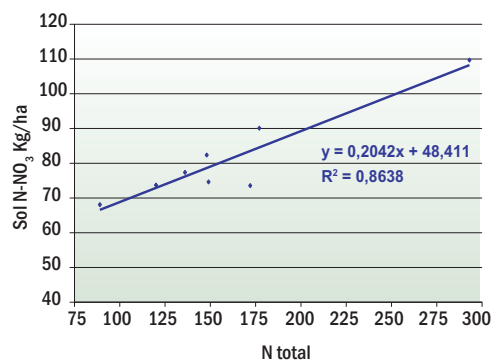


Figure 4. Relation entre la teneur en nitrates résiduels des sols après la récolte de la pomme de terre et la quantité d'azote total appliqué.

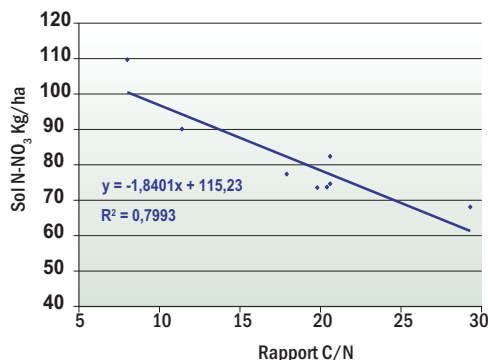


Figure 5. Relation entre la teneur en nitrates résiduels des sols après la récolte des pommes de terre et le rapport C/N des engrais organiques appliqués.

tité totale d'azote apportée au sol ( $R^2=0,86$ ) (figures 4 et 5). Cette étude a indiqué que les accumulations de nitrates dans le profil du sol ont été généralement faibles lorsque les engrais organiques appliqués avaient des rapports C/N supérieurs à 20 ou que les engrais avaient subi une phase de compostage. Les teneurs en nitrates à l'automne sont également corrélées avec le CEN ( $r = 0,76$ ), ce qui indique que les engrais organiques avec une efficacité fertilisante plus élevée ont tendance à laisser plus de nitrates dans les sols en fin de saison suite à une minéralisation tardive de N.

## Conclusion

Les résultats obtenus dans cet essai indiquent que les apports de fumiers solides de bovins et de boues mixtes ont amélioré la productivité du sol. Apportés seuls, ces engrais organiques ont permis d'obtenir des augmentations du rendement total en pomme de terre de  $3,57$  à  $17,18 \text{ t ha}^{-1}$  et du rendement vendable de  $2,51$  à  $16,34 \text{ t ha}^{-1}$ . Un complément de fumure azotée minérale a permis le plus souvent d'obtenir les rendements les plus élevés. Les coefficients d'utilisation de l'azote ont été différents entre les types d'engrais organiques, en raison de leur composition chimique et de leur degré de compostage. Les coefficients d'utilisation de l'azote (CUN) obtenus ont varié entre 13,2 et 27,43 %. Les coefficients d'efficacité de l'azote des engrais organiques (CEN) ont varié entre 24,56 et 51,05 %. Ils ont été les plus élevés pour les boues mixtes ayant de faibles rapports C/N et les plus faibles pour les fumiers compostés et les fumiers frais avec un rapport C/N élevé. Le rapport  $\text{N-NH}_4/\text{N}$  total mesuré n'est pas relié au CEN dans le cas des boues mixtes de papetières qui en contiennent très peu. Par contre, le rapport C/N des engrais est bien corrélé avec leur efficacité fertilisante. En deuxième année, les CEN ont varié de 2,26 à 28,40 %. Ils ont été les plus faibles pour les fumiers compostés et les boues à faible rapport C/N et les plus élevés pour les fumiers frais. Globalement les CEN n'ont pas été influencés par les périodes d'application (automne versus printemps) pour un même type d'engrais organique.

Les résultats indiquent que la pomme de terre peut valoriser l'azote des engrais organiques mais la minéralisation tardive de cet élément peut avoir des effets nuisibles sur la maturité physiologique et le poids spécifique des tubercules lorsque la dose complémentaire d'azote est élevée. Certains engrais organiques à forte libération d'azote peuvent également avoir des incidences sur la gale ou la rhizoctonie particulièrement avec un apport complémentaire d'azote minéral. Une attention particulière doit être apportée pour déterminer la dose d'azote complémentaire qui convient en fonction du coefficient d'efficacité de l'azote de l'engrais organique appliqué. Comme la minéralisation tardive de l'azote des engrais organiques risque de diminuer le poids spécifique, de retarder la maturité et d'augmenter potentiellement les sucres réducteurs des tubercules, il serait prudent ne pas en appliquer sur la pomme de terre de transformation et d'utiliser des cultivars moins sensibles.

## Remerciements

Cette recherche a été réalisée grâce aux fonds de recherche accordés par la compagnie Bowater et l'IRDA. Nous sommes très reconnaissants pour l'aide financière apportée.

## Bibliographie

- Atlantic Canada potato Committee 1981. Atlantic Canada potato guide. 37 p.
- Beauchamp, E. G. 1986. Availability of nitrogen from three manures to corn in the field. *Can. J. Soil Sci.* 66: 713-720.
- Chadwick, D.R., John, F. Pain, B.F., Chambers, B.J. and Williams, J. 2000. Plant uptake of nitrogen from the organic nitrogen fraction of animal manures: a laboratory experiment. *J. Agric. Sci.* 134: 159-168.
- Douglas, B. F. and FR, Magdoff 1991. An evaluation of nitrogen mineralization indices for organic residues. *J. Environ. Qual.* 20: 368-372.
- Fierro, A., Angers, D.A. and C.J., Beauchamp 2000. Decomposition of paper de-inking sludge in a sandpit minesoil during revegetation. *Soil Biol. Biochem.* 32: 143-150.
- Gagnon, B., R.R. Simard, M. Goulet, M. Robitaille et R. Rioux 1998. Soil nitrogen and moisture as influenced by composts and inorganic fertilizer rate. *Can. J. Soil Sci.* 78: 207-215.
- Giroux, M., D. Côté et R. Morin. 2000. 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.
- N'Dayegamiye, A., S. Huard et Y. Thibault 2001. Valeur fertilisante des boues mixtes de papetières dans des sols cultivés en maïs-grain, soya et orge. *Agrosol* 12 (1) : 25-34.
- N'Dayegamiye, A. and Thi Sen Tran 2001. Effects of green manures on soil organic matter and wheat yields and N nutrition. *Can. J. Soil Sci.* 81: 371-382.
- N'Dayegamiye, A., M. Giroux et R. Royer 2004. Épandages d'automne et de printemps de divers fumiers et boues mixtes de papetières : coefficients d'efficacité de l'azote et nitrates dans le sol. *Agrosol* 15 (2) : 97-106.
- Palm, C. A. and P. A. Sanchez 1991. Nitrogen release from the leaves of some tropical legumes as affected by their lignin and polyphenolic contents. *Soil Biol. Biochem.* 23: 83-88.
- 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.R., R. Lalande, B. Gagnon, G. Parent et P. Parent 1998. Beneficial use of papermill residue compost in potato production. Composting council of Canada. 11 p.
- Tran, T.S. et M. Giroux 1991. Fertilisation azotée (15N) de la pomme de terre de primeur (*Solanum tuberosum*) selon les dates de récoltes. *Agrosol* 4(1) : 20-29.
- Vagstad, N., Broch-Due, A. and I. Lyngstad 2001. Direct and residual effects of pulp and paper mill sludge on crop yield and soil mineral. *Soil Use and Management* 17: 173-178.