

BÉNÉFICES DES ENGRAIS VERTS D'ÉTÉ ET D'AUTOMNE POUR LA PRODUCTION DE POMME DE TERRE

Rapport de recherche 2007-2009

Présenté par :

Adrien N'Dayegamiye¹, agr, Ph.D., Judith Nyiraneza¹, agr., Ph.D.
Marc Laverdière¹, agr., Ph.D., Guy Roy², agr.
Gérard Gilbert³, agr., M. Sc

.....4 Octobre 2010



¹ Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA)

² Gosselin prod. FG inc.

³ Laboratoire de diagnostique en phytoprotection, Direction de l'innovation scientifique et technologique, MAPAQ

RÉSUMÉ

Cette étude d'une durée de trois ans (2007-2009) a porté, dans un premier temps, sur le bilan d'azote dans une production de pomme de terre et dans, un deuxième temps, sur l'évaluation de différentes cultures de rotation quant à leur potentiel pour valoriser l'engrais azoté résiduel. L'azote marqué ^{15}N (3,1 % atomes de ^{15}N) a été appliqué en 2007 à une dose de 150 kg N/ha dans une culture de pomme de terre qui a précédé l'implantation en 2008 de onze différentes cultures. Les divers traitements (cultures) incluaient le maïs, l'orge ou l'avoine en rotation avec la pomme de terre. Trois engrais verts d'été ont également été ensemencés : millet perlé, moutarde jaune, millet sibérien. Cinq engrais verts d'automne (avoine, blé, moutarde jaune, seigle, millet sibérien) complétaient la liste des cultures évaluées alors que la pomme de terre en continu constituait le témoin. Les biomasses des engrais verts étaient incorporées au sol. En 2009, les parcelles avec ces différents précédents culturaux ont été subdivisées en six sous-parcelles qui ont reçu cinq doses d'engrais azoté (0, 50, 100, 150 et 200 kg N/ha) pour la pomme de terre ou une dose de 150 kg N/ha sous forme de $^{15}\text{NH}_4\text{NO}_3$ (1 % atomes de ^{15}N).

En 2007, les coefficients réels d'utilisation d'azote (^{15}N) par la pomme de terre ont été de 37,2 %. L'azote récupéré dans le sol (0-90 cm) à l'automne après la récolte était de l'ordre de 40,4 %, alors que les pertes représentaient donc 22,4 %. Au printemps 2008, l'azote ^{15}N résiduel déterminé sur la profondeur de 0-90 cm représentait 43 % de la dose appliquée en 2007. Les diverses cultures implantées en 2008 n'ont utilisé que de 0,37 % et 2,7 % de l'azote résiduel. Au printemps 2009, la proportion de l'azote apporté en 2007 et retrouvée dans le sol (0-90 cm) était encore élevée, soit 39,65 %. De cette quantité, 70% se retrouvait dans la couche arable (0-30 cm). Ces résultats indiquent que même si les cultures de rotation et les engrais verts n'ont utilisé qu'une faible partie de l'engrais azoté ^{15}N , ils ont toutefois aidé à réduire les pertes d'azote, probablement préservé sous forme organique dans leur biomasse aérienne et racinaire. En effet, les quantités d'azote du sol prélevées par les engrais verts étaient importantes, variant de 51,7 à 94,8 kg N/ha, selon les espèces.

En comparaison avec la pomme de terre en continu, les cultures de rotation et les engrais verts ont accru de plus de 40 % en moyenne les rendements vendables de pomme de terre en 2009 et augmenté le poids spécifique des tubercules ainsi que les prélèvements en azote. De plus, ils ont augmenté significativement les coefficients d'efficacité de l'engrais azoté appliqué (kg de rendement par kg azote). Les coefficients apparents et réels d'utilisation d'azote ont varié de 40 à 58 % et de 31 à 42 % respectivement avec les cultures de rotation et les engrais verts, comparativement à 33 % et 32 % respectivement pour la pomme de terre en continu.

Cette étude a démontré que les bénéfices sur la productivité du sol et l'efficacité de l'engrais azoté ont été plus importants avec les engrais verts d'été ou d'automne qu'avec les cultures de rotation conventionnelles (maïs, orge et avoine). Les effets des engrais verts d'été et d'automne ont été similaires. Parmi les engrais verts étudiés, ce sont la moutarde, le millet perlé comme engrais verts d'été, le blé, l'avoine et le seigle comme engrais verts d'automne qui ont le plus amélioré la productivité du sol et amélioré l'efficacité de l'engrais azoté appliqué. Les gains obtenus des engrais verts ne sont pas reliés au recyclage de l'azote, mais probablement à leurs effets bénéfiques sur certaines propriétés du sol qui ont favorisé par conséquent une meilleure croissance de la pomme de terre ainsi qu'une meilleure absorption de l'engrais minéral.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	2
1. INTRODUCTION	5
2. MATÉRIEL ET MÉTHODES	7
2.1. RENDEMENTS EN POMME DE TERRE ET BILAN D'AZOTE	8
2.1.1. Rendements, poids spécifique et teneur en matière sèche	8
2.1.2. Bilans réels (¹⁵ N) et migration des nitrates dans le sol	8
2.2. CULTURES INSÉRÉES DANS LA RÉGIE	8
2.2.1. Rendements en matière sèche et prélèvements en azote	8
2.3. RENDEMENT EN POMME DE TERRE ET DISPONIBILITÉ DE L'AZOTE	10
2.3.1. Effet de différentes cultures implantées en 2008 sur le rendement et la qualité de la pomme de terre en 2009	10
3. ANALYSES DES SOLS ET DES VÉGÉTAUX	11
4. CALCULS	12
5. ANALYSES STATISTIQUES	12
6. RÉSULTATS ET DISCUSSION	13
6.1. PRODUCTION DE POMME DE TERRE ET EFFICACITÉ D'AZOTE (2007)	13
6.1.2. Nitrates dans le profil du sol dans la culture de la pomme de terre	14
6.1.3. Coefficients et bilans réels d'utilisation de l'azote (¹⁵ N)	15
6.2. ENGRAIS VERTS D'ÉTÉ ET D'AUTOMNE EN 2008	20
6.2.1. Caractéristiques des engrais verts d'été et d'automne, rendements en matière sèche et prélèvements en N	20
6.3. EFFETS DES ENGRAIS VERTS D'ÉTÉ ET D'AUTOMNE EN 2009	21
6.3.1. Rendement total et rendement vendable	21
6.3.2. Poids spécifique de la pomme de terre	24
6.3.3. Prélèvement en azote	24
6.3.4. Coefficients apparents et réels d'utilisation de l' engrais azoté	25
6.3.5. Coefficient d'efficacité de l'azote (CEN)	28
6.3.6. Incidence du mildiou et de la rhizoctonie sur la culture de la pomme de terre	29
7. CONCLUSION	31
8. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	32

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Analyses physico-chimiques du sol au début de l'expérience en 2007.	7
Tableau 2. Teneurs du sol en azote total et en éléments majeurs en 2007.	7
Tableau 3. Description de la séquence des cultures étudiées de 2007 à 2009.	9
Tableau 4. Taux de semis, dates de semis et de récolte des cultures, selon les traitements en 2008.	10
Tableau 5. Rendements et prélèvements en azote de la pomme de terre en 2007.	13
Tableau 6. Teneur en nitrates du sol aux profondeurs de 0-30, 30-60, 60-90 cm dans des parcelles en 2007 et 2008.	14
Tableau 7. Proportion (%) de ¹⁵ N récupéré dans la pomme de terre et dans le sol en 2007.	15
Tableau 8. Proportion de ¹⁵ N récupérée (%) dans le sol au printemps 2008.	17
Tableau 10. Rendements en matière sèche et prélèvements en N des engrais verts d'été et d'automne en 2008.	20
Tableau 12. Prélèvement en N, coefficients d'utilisation et d'efficacité de l'azote pour la pomme de terre en 2009.	26
Tableau 13. Proportion du ¹⁵ N récupérée dans les cultures et dans le sol.	27
Tableau 14. Incidence du mildiou et indice de sclérotification de la rhizoctonie en 2009.	30

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Bilan réel de l'azote marqué ¹⁵ N sous la culture de la pomme de terre en 2007	16
---	----

1. INTRODUCTION

L'utilisation des engrais azotés dans la production de la pomme de terre (*Solanum tuberosum* L.) est une pratique agricole importante qui permet des augmentations de rendement. Par contre les doses élevées d'engrais azotés peuvent en diminuer la qualité, augmenter l'incidence des maladies et conduire à des pertes de nitrates dans le sol et dans l'eau de drainage.

Les sols cultivés en pomme de terre sont surtout de texture sablonneuse et ils retiennent moins efficacement l'engrais azoté (Tran et Giroux, 1991). Gasser *et al.* (2002) ont montré que les charges en nitrates lessivées sous cette culture sont parfois 1,3 fois supérieures à celles mesurées sous la culture de céréales et de 5 à 15 fois supérieures à celles sous prairie de trèfle rouge et de fléole. Ces quantités de nitrates constituent ainsi une source potentielle de pollution des eaux souterraines et de la nappe phréatique.

Une utilisation optimale de l'azote dans la production de la pomme de terre s'avère ainsi très importante afin d'augmenter sa rentabilité tout en réduisant les risques de pollution environnementale. Dans ce contexte, l'introduction d'une culture en rotation avec la pomme de terre ou d'un engrais vert, lesquels sont susceptibles d'enrichir le sol en azote ou de valoriser l'azote résiduel après la récolte de la pomme de terre, suscite beaucoup d'intérêt.

Les quantités d'azote retournées au sol suite à l'enfouissement des engrais verts, sont reliées aux biomasses produites et incorporées, tandis que les taux de minéralisation d'azote et sa disponibilité aux cultures subséquentes dépendent de la composition chimique des biomasses incorporées et particulièrement de leur rapport C/N (Abdallahi et N'Dayegamiye, 2000). Les engrais verts enfouis jeunes avant ou après la floraison se décomposent très rapidement (N'Dayegamiye et Tran, 2001), tandis que ceux qui sont récoltés plus tardivement se décomposent très lentement libérant peu d'azote aux cultures suivantes et conduisant parfois à l'immobilisation d'azote (Gasser *et al.*, 1995 ; Snapp et Fortuna, 2003).

Selon les objectifs visés, la performance des engrais verts dépendra donc du choix de l'espèce, de la période de semis, des dates de récolte et d'enfouissement au sol (N'Dayegamiye *et al.*, 2007). Les travaux de recherche menés sur les engrais verts d'été et d'automne sont relativement récents. Les engrais verts d'été (millet japonais, moutarde blanche, trèfle) sont relativement bien documentés pour les conditions du Québec et du nord des États-Unis (N'Dayegamiye et Tran, 2001; Creamer et Baldwin, 2000; Snapp et Mutch, 2003), alors que la documentation sur les engrais verts d'automne (seigle, blé, moutarde, etc.) est beaucoup moins disponible (Gasser *et al.*, 1995 ; Wyland *et al.*, 1998; Snapp et Fortuna, 2003).

Les bénéfices des engrais verts ne sont pas reliés uniquement à leurs apports en azote. Une étude effectuée au Québec a démontré que les engrais verts d'été ont amélioré la structure du sol et par conséquent la disponibilité de l'azote, augmentant ainsi les rendements du maïs et du blé (N'Dayegamiye et Tran, 2001). De même, l'introduction d'engrais verts d'été dans la rotation de la pomme de terre a permis de briser les cycles des maladies. Par exemple, l'incorporation du trèfle a diminué la rhizoctonie (*Rhizoctonia solani*) (Honeycutt *et al.*, 1996) et l'application de la moutarde blanche (*Brassica sp.*) a diminué l'infestation de la pourriture aqueuse (*Pythium spp.*) des tubercules de pomme de terre (Abawi et Widmer, 2000). Les engrais verts ont également permis de diminuer l'infestation de mauvaises herbes et d'assurer le contrôle des populations de nématodes (Gallandt *et al.*, 1998 ; Porter *et al.*, 1998).

Pour les entreprises agricoles, les bénéfices reliés aux engrais verts du sol peuvent par conséquent se traduire par la réduction des intrants (engrais minéraux, pesticides) et l'augmentation des rendements (N'Dayegamiye et Tran, 2001). Les principaux coûts associés à cette pratique sont l'acquisition des semences et ceux découlant des opérations de semis et d'incorporation des biomasses végétales dans les sols. Toutefois, il a été démontré que les bénéfices sont généralement supérieurs aux coûts (Helmers *et al.*, 1996). Par ailleurs, l'introduction des engrais verts dans les rotations agricoles présente aussi des avantages pour la société en général, principalement en réduisant les risques de pertes de sol, de nitrates et de pesticides. C'est pourquoi les meilleures rotations agricoles pourraient même servir comme incitatifs environnementaux dans les plans gouvernementaux de soutien au développement agricole.

Sous les conditions climatiques du Québec, il serait possible d'établir des engrais verts ou plantes de couverture après les cultures récoltées hâtivement comme les légumes de conserverie ou le maïs sucré ou encore en fin août-début septembre, comme la pomme de terre de primeur et plusieurs autres cultures maraîchères. Sous ces conditions, il sera possible d'implanter la moutarde blanche, le seigle, le radis huileux et le blé d'automne qui pourront atteindre une bonne croissance et une production élevée de biomasses (Snapp et Fortuna, 2003). Cependant, il existe beaucoup plus d'espèces pouvant servir d'engrais verts en saison estivale. Ces dernières sont ainsi introduites de temps en temps dans les cycles de rotations agricoles, dans le but de contrôler les mauvaises herbes et les maladies et de restaurer la qualité et la fertilité des sols. Plusieurs espèces sont en évaluation ou sont déjà utilisées en rotation au Québec dont le sarrasin, la moutarde blanche, le millet japonais, le trèfle, la luzerne et le millet perlé.

Toutefois, il existe peu d'études qui ont comparé les effets des engrais verts d'été et d'automne avec les cultures de rotation conventionnelles (maïs-céréales-pomme de terre) sur les rendements et la qualité de la pomme de terre, sur l'efficacité de l'engrais azoté et sur la réduction des pertes de nitrates dans le sol. Cette étude de trois ans (2007 à 2009) avait comme objectifs principaux : (i) de mesurer à l'aide d'engrais azoté marqué ^{15}N les bilans réels d'azote sous la culture de la pomme de terre en 2007, (ii) de déterminer les quantités d'azote résiduel prélevées par différentes cultures de rotation, les rendements en matière sèche produite par ces cultures et leur rapport C/N l'année suivante (2008), (iii) de déterminer l'effet de ces différentes cultures de rotation sur les rendements en pomme de terre, les prélèvements en azote et les coefficients apparents et réels (^{15}N) d'utilisation de l'engrais azoté appliquée sous ces divers types de rotation, et sur l'incidence de certaines maladies.

2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

L'expérience a été menée sur une période de trois ans, de 2007 à 2009, à la station de recherche du CRSAD à Deschambault. Le site expérimental mesurait 125 m x 116 m.

Les résultats des analyses physico-chimiques du sol en 2007 sont présentés dans les tableaux 1 et 2. Le sol utilisé était un loam sableux fin de la série Batiscan contenant en moyenne 21 % d'argile, 30 % de limon et 49 % de sable. Son pH (à l'eau) était de 6,3 et la teneur mesurée en matière organique était de 4,0 %. La teneur moyenne en N total était de 0,19 % alors que celles en P, K, Ca et Mg étaient respectivement de 81,3; 40,5; 1349 et 46,8 mg/kg.

Tableau 1. Analyses physico-chimiques du sol au début de l'expérience en 2007.

Site*	pH	M.O. (%)	NO ₃ ⁻ (mg/kg)	Texture			Classe texturale
				Sable	Limon (%)	Argile	
1	5,9	4,0	15,2	57	21	22	Loam sablo-argileux
2	6,2	3,1	13,2	60	21	19	Loam sableux fin
3	6,5	4,1	12,8	37	38	25	Loam
4	6,5	2,5	11,4	55	28	17	Loam sableux fin
5	6,4	4,4	16,7	47	31	22	Loam
6	6,4	5,0	15,8	39	39	22	Loam
Moyenne	6,3	4,0	14,2	49	30	21	
Écart-type	0,21	0,8	2,03	9,0	7,9	2,8	

* site d'échantillonnage de la parcelle expérimentale

Tableau 2. Teneurs du sol en azote total et en éléments majeurs en 2007.

Site*	N total (%)	P (mg/kg)	K	Ca	Mg
1	0,20	94,5	34,2	942	88,2
2	0,16	97,7	53,3	1022	41,9
3	0,20	73,3	37,9	1649	47,1
4	0,13	111	36,7	1097	24,5
5	0,21	59,5	44,6	1766	43,5
6	0,23	52,0	36,2	1618	35,3
Moyenne	0,19	81,3	40,5	1349	46,7
Écart-type	0,04	23,3	7,2	367	21,8

* site d'échantillonnage de la parcelle expérimentale

2.1. RENDEMENTS EN POMME DE TERRE ET BILAN D'AZOTE

2.1.1. Rendements, poids spécifique et teneur en matière sèche

Au printemps 2007, la pomme de terre (cv Andover) a été plantée dans 36 parcelles de 40 m x 6 m chacune. Une fertilisation uniforme a été appliquée au moment de la plantation selon l'analyse du sol et les besoins de la culture (150 kg/ha de N sous forme de nitrate d'ammonium calcique [CAN]), (134 kg/ha de superphosphate, 116 kg/ha de muriate de potassium et 25 kg/ha de Sulpomag). La plantation a été effectuée le 31 mai et le buttage le 2 juillet. Les produits phytosanitaires ont aussi été appliqués pour contrôler les mauvaises herbes, le doryphore et le mildiou. Deux applications de défanant Reglone ont été faites à 7 jours d'intervalle (22 et 30 août). Dans chacun des traitements, les tubercules ont été récoltés le 24 septembre à l'aide d'une récolteuse mécanique à un rang sur une distance de 10 m. Les tubercules ainsi recueillis ont été pesés et classifiés pour évaluer le rendement vendable (47-114 mm). Des sous-échantillons ont aussi été prélevés pour déterminer le poids spécifique, la teneur en matière sèche des tubercules et les prélèvements en azote.

2.1.2. Bilans réels (¹⁵N) et migration des nitrates dans le sol

Afin de mesurer les bilans réels en azote, des sous-parcelles de 4,5 m² ont été implantées au milieu de chacune des 36 grandes parcelles. Une fertilisation azotée équivalente à 150 kg N/ha a été apportée sous forme d'azote marqué ¹⁵N (solution de nitrate d'ammonium enrichie à 5 % de l'isotope ¹⁵N) après l'émergence des plants. Dans ces sous-parcelles, outre l'apport de ¹⁵N, les autres engrais minéraux (superphosphate, muriate de potassium et Sulpomag) ont été appliqués à des doses identiques à celles apportées dans les grandes parcelles.

Pour calculer le bilan en azote, la partie aérienne (tiges et feuilles) a été récoltée avant le défanage et les tubercules ont été récoltés à la main dans les sous-parcelles. Les teneurs en N total et en ¹⁵N de ces différents échantillons ont permis d'évaluer les quantités d'azote prélevées par la pomme de terre ainsi que la proportion de cet élément provenant de l'engrais minéral ¹⁵N apporté.

De plus, pour obtenir le bilan réel complet, les quantités de ¹⁵N résiduel après la récolte ont été mesurées à trois profondeurs du sol, soient 0-30, 30-60 et 60-90 cm. Ces mesures ont été prises après la récolte de 2007, au printemps 2008 et au printemps 2009.

Les teneurs en ¹⁵N de la biomasse (tiges et tubercules) et du sol ont permis d'évaluer les bilans d'azote dans la plante et le sol et d'estimer les pertes d'azote par différence.

2.2. CULTURES INSÉRÉES DANS LA RÉGIE

2.2.1. Rendements en matière sèche et prélèvements en azote

En 2008, les 36 parcelles expérimentales ont été semées en engrais verts d'été (moutarde jaune, millet sibérien, millet perlé), en cultures de rotation conventionnelles (avoine, orge, maïs-grain), en engrais verts d'automne (avoine, moutarde jaune, millet sibérien, blé, seigle) précédés par la culture de la pomme de terre, cv Envol, et ou en pomme de terre en continu (Tableau 3). Au total, douze traitements représentés par ces différentes cultures ainsi que par la culture de pomme de terre en continu ont été comparés, et chaque traitement était répété trois fois. Les taux de semis, les dates de semis et de récolte de toutes les cultures de rotation figurent dans le tableau 4.

Tableau 3. Description de la séquence des cultures étudiées de 2007 à 2009.

Année	Culture
2007	Pomme de terre
	Rotation conventionnelle
	Avoine (<i>Avena sativa</i> L.)
	Orge (<i>Hordeum vulgare</i>)
	Maïs grain (<i>Zea mays</i> L.)
	Engrais verts d'été
	Moutarde jaune (<i>Sinapis alba</i> L.)
	Millet sibérien (<i>Setaria italica</i>)
2008	Millet perlé (<i>Pennisetum glaucum</i>)
	Engrais verts d'automne
	Pomme de terre-Avoine (<i>Avena sativa</i> L.)
	Pomme de terre-Moutarde jaune
	Pomme de terre-Blé (<i>Triticum aestivum</i> L.)
	Pomme de terre-Seigle (<i>Secale cereale</i>)
	Culture continue
	Pomme de terre (<i>Solanum tuberosum</i>)
2009	Pomme de terre

Les engrais verts d'été ont été récoltés à pleine floraison selon les espèces à l'aide d'une fourragère motorisée. Les biomasses ont été ramassées sur 6 m², pesées puis retournées au sol. Un sous-échantillon de 600 g a été prélevé pour les analyses. Les engrais verts d'automne ont été coupés au mois de novembre. Un sous-échantillon a été prélevé également pour analyses. Les engrais verts d'été ont été incorporés dans les parcelles à l'aide d'une herse à disques et par labour pour les engrais verts d'automne.

Tableau 4. Taux de semis, dates de semis et de récolte des cultures, selon les traitements en 2008.

Cultures	Taux de semis	Date de semis	Date de récolte
Pomme de terre	43 000 pl/ha	21 mai	25 août
Avoine	120 kg/ha	25 mai	17 septembre
Orge	150 kg/ha	26 mai	17 septembre
Maïs grain	80 000 plants/ha	30 mai	30 octobre
Moutarde jaune	21 kg/ha	25 mai	14 août*
Millet sibérien	40 kg/ha	25 mai	14 août*
Millet perlé	30 kg/ha	26 mai	21 août*
Pomme de terre	43 000 pl/ha	21 mai	25 août
Avoine	120 kg/ha	27 août	4 novembre*
Pomme de terre	43 000 pl/ha	21 mai	25 août
Moutarde jaune	21 kg/ha	25 août	4 novembre*
Pomme de terre	43 000 pl/ha	21 mai	25 août
Blé	165 kg/ha	27 août	4 novembre*
Pomme de terre	43 000 pl/ha	21 mai	25 août
Seigle	120 kg/ha	27 août	4 novembre*

* date de coupe et d'incorporation pour les engrais verts

2.3. RENDEMENT EN POMME DE TERRE ET DISPONIBILITÉ DE L'AZOTE

2.3.1. Effet de différentes cultures implantées en 2008 sur le rendement et la qualité de la pomme de terre en 2009

En 2009, la pomme de terre (c.v Snowden), a été plantée dans les 36 parcelles expérimentales ayant comme précédents culturaux les cultures de rotation ainsi que les engrais verts d'été et d'automne cultivés en 2008. Ces grandes parcelles principales (6 m x 40 m) ont été subdivisées en sous-parcelles (5 m x 6 m) pour recevoir des doses croissantes d'azote, soient 0, 50, 100, 150, 200 kg/ha de N. Une dose de 150 kg N/ ha sous forme de $^{15}\text{NH}_4\text{NO}_3$ (1 % atomes de ^{15}N), a été appliquée dans des parcelles de 5 m x 6 m distribuées à l'intérieur de chaque parcelle principale avec différents précédents culturaux. Une fertilisation uniforme de 134 kg/ha de superphosphate et de 116 kg/ha de muriate de potassium a été apportée dans toutes les parcelles. La récolte de la pomme de terre a été effectuée dans chacune des sous-parcelles, sur deux rangs de 4 m x 6 m. Les tubercules récoltés dans chaque parcelle ont été pesés pour déterminer le rendement total. La classification des tubercules a permis de mesurer le rendement vendable

(tubercules dont le diamètre était compris entre 47 et 114 mm). Des sous-échantillons ont été prélevés pour déterminer le poids spécifique (qualité) et la teneur en matière sèche des tubercules. Les maladies de la pomme de terre (le mildiou et la rhizoctonie) ont été identifiées sur les parties aériennes au cours de l'été et sur les tubercules à la récolte à partir de tests diagnostics. Dans les sous-parcelles de 4,2 m² ayant reçu l'engrais marqué ¹⁵N, les échantillons de tubercules, de tiges et de feuilles ont été récoltés avant le défanage, à la main et sur une longueur de 1m, séchés et broyés afin de déterminer leur teneur en azote total et en ¹⁵N.

3. ANALYSES DES SOLS ET DES VÉGÉTAUX

Au début de l'expérimentation, les analyses physico-chimiques de sol ont été effectuées (Tableau 1). Six échantillons composés ont été prélevés aléatoirement dans le champ destiné aux essais, à la profondeur de 0-30 cm. La texture des sols a été déterminée par granulométrie selon la méthode de Gee et Bauder (1986). Les teneurs en nitrates ont été déterminées par colorimétrie sur un auto-analyseur en flux continu (Quickchem 8000, Lachat Instruments) après extraction avec une solution de KCl 1N (Maynard et Kalra, 1993); les teneurs en éléments majeurs et en azote total (Tableau 2) ont été déterminées respectivement par la méthode de Mehlich-3 (Mehlich, 1984) et par digestion Kjeldahl.

Les concentrations en azote des tissus végétaux de la pomme de terre et des engrais verts ont été déterminées par digestion dans un mélange de H₂SO₄-H₂O₂ (30 %) sur un bloc digesteur BD-40 préalablement chauffé à 370 °C (Isaac et Johnson, 1980) et les teneurs en azote total ont été déterminées par Auto-analyseur Technicon. L'analyse des teneurs en ¹⁵N des tissus végétaux a été effectuée par spectrométrie de masse au laboratoire UC Davis Stable Isotope Facility, Davis, Californie. Les teneurs en carbone des engrais verts ont été déterminées par combustion sèche (Leco CNS-1000, Leco Corporation).

Les sous-parcelles fertilisées à l'azote marqué ¹⁵N ont été échantillonnées après la récolte de la pomme de terre en 2007 et au printemps 2008 aux profondeurs de 0-30 cm, 30-60 cm et 60-90 cm, avec un échantillonneur motorisé «Gidding» et leur teneur en ¹⁵N résiduel ont été déterminées tel que mentionné dans le paragraphe ci-dessus.

4. CALCULS

Les prélèvements de la pomme de terre en azote total ont été calculés en multipliant les concentrations en azote (% N) par le rendement en matière sèche (kg/ha).

Le coefficient apparent d'utilisation de l'azote de l'engrais a été déterminé par la méthode de différence selon l'équation 1.

$$\text{CAUN} = (\text{prélèvement en N}_{\text{TRAITEMENT}} - \text{prélèvement en N}_{\text{TÉMOIN}}) / \text{dose de N}_{\text{ENGRAIS}} \quad [1]$$

Le pourcentage de N dérivé de l'engrais $^{15}\text{NH}_4^{15}\text{NO}_3$ (NDDE) dans la plante et le sol a été déterminé selon les équations 2 et 3 (N'Dayegamiye et Tran, 2001).

$$\text{NDDE}_{\text{PLANTE}} = [(\text{excès } ^{15}\text{N}_{\text{PLANTE}}) / \text{excès } ^{15}\text{N}_{\text{ENGRAIS}}] \times 100 \quad [2]$$

$$[\text{NDDE}_{\text{SOL}} = [(\text{excès } ^{15}\text{N}_{\text{SOL}}) / \text{excès } ^{15}\text{N}_{\text{ENGRAIS}}] \times 100 \quad [3]$$

Les coefficients réels d'utilisation de l'azote l'engrais (^{15}N) ($\text{CRU}_{\text{ENGRAIS}}$) par la plante ($\text{CRU}_{\text{PLANTE}}$) et récupéré dans le sol (CRU_{SOL}) ont été déterminés selon les équations 4 et 5.

$$\text{CRU}_{\text{PLANTE}} = (\text{N total prélevé} \times \text{NDDF}_{\text{PLANTE}}) / \text{quantité de l'engrais } ^{15}\text{N} \quad [4]$$

$$\text{CRU}_{\text{SOL}} = (\text{N total sol} \times \text{NDDF}_{\text{SOL}}) / \text{quantité de l'engrais } ^{15}\text{N} \quad [5]$$

5. ANALYSES STATISTIQUES

En 2007, la pomme de terre était cultivée dans toutes les 36 parcelles prévues pour accueillir les plantes de rotation en 2008. L'essai sur la pomme de terre en 2007 visait à évaluer l'utilisation de l'azote (^{15}N) par la plante, sa dynamique dans le sol (0-90 cm) et à mesurer les pertes d'azote sous cette culture. L'essai n'avait pas de traitements comparatifs, seulement les moyennes et l'écart type sont indiqués pour évaluer la variation des paramètres.

En 2008, le dispositif expérimental était en blocs randomisés où 12 traitements en trois répétitions, étaient comparés. Les traitements comprenaient les cultures de rotation pour la pomme de terre, les engrais verts d'été et d'automne et la pomme de terre en continu. Une analyse de variance a été faite pour les coefficients réels d'utilisation de l'azote marqué (^{15}N) par les différentes cultures établies en 2008, et également pour l'azote résiduel de l'engrais ^{15}N appliqué en 2007.

Pour l'essai de 2009, le dispositif expérimental était un split-plot avec les différentes cultures de rotation en parcelles principales et les différentes doses d'azote en sous-parcelles. L'analyse de la variance a été effectuée avec PROC MIX sur SAS afin de déterminer les effets des précédents culturaux et des doses d'azote sur les paramètres mesurés (rendement vendable, poids spécifique, prélèvement en N, coefficient d'utilisation de l'azote, efficacité de N, incidence de mildiou sur le feuillage et l'incidence de rhizoctonie sur les tubercules). L'analyse des contrastes a permis de déterminer les effets linéaire, quadratique et cubique des apports d'azote et de comparer les différents précédents culturaux entre eux.

6. RÉSULTATS ET DISCUSSION

6.1. PRODUCTION DE POMME DE TERRE ET EFFICACITÉ D'AZOTE (2007)

En 2007, la pomme de terre (cv Andover) a été cultivée sur tout le site expérimental. L'essai visait à évaluer les effets d'apport d'engrais azoté sur la production et la nutrition en azote de la pomme de terre, et à connaître, grâce à l'engrais marqué ¹⁵N, l'efficacité de l'engrais appliqué et le bilan complet de l'azote (prélèvements par la culture, ¹⁵N résiduel dans le profil de sol et les pertes d'azote).

Les rendements et les prélèvements en azote de la pomme de terre sont indiqués dans le tableau 5. En moyenne, les rendements obtenus en pomme de terre étaient de 34,1 t/ha avec un poids spécifique moyen de 1,0822 kg/kg et un prélèvement en azote de 118 kg/ha. Ce rendement se situait près de la moyenne de la production de la pomme de terre au Québec, qui était de 31,97 t/ha pour l'année 2007 (Statistiques Canada, 2010).

Tableau 5. Rendements et prélèvements en azote de la pomme de terre en 2007.

Parcelle expérimentale*	Rendement total (t/ha)	Rendement vendable (t/ha)	Poids spécifique (kg/kg)	Prélèvement en N des tubercules (kg N/ha)
1	23,0	21,8	1,0793	71,7
2	29,6	28,5	1,0836	104,5
3	32,4	31,6	1,0511	117,5
4	38,8	35,9	1,0819	152,0
5	39,8	37,8	1,0838	144,4
6	32,8	30,7	1,0820	113,2
7	43,9	41,8	1,0819	152,0
8	27,8	26,6	1,0824	90,7
9	37,1	34,8	1,0823	119,9
10	30,5	29,4	1,0807	96,9
11	43,0	40,9	1,0817	150,4
12	31,1	30,2	1,0845	102,1
Moyenne	34,1	32,5	1,0822	117,9
Écart-type	6,4	5,9	0,0014	26,7

* Parcelles principales pour les cultures prévues pour 2008.

6.1.2. Nitrates dans le profil du sol dans la culture de la pomme de terre

L'analyse des teneurs en nitrates a été effectuée en automne 2007 après la récolte de la pomme de terre et au printemps 2008 aux profondeurs de 0-30 cm, de 30-60 cm et de 60-90 cm (Tableau 6). En automne 2007, les teneurs en nitrates ont varié selon les profondeurs du sol. Elles étaient en moyenne de 37,6 mg NO₃/kg dans le profil du sol étudié (0-90 cm). Les quantités de nitrates représentaient 62, 26 et 11 % respectivement pour les couches de 0-30 cm, 30-60 cm et 60-90 cm. Les quantités de nitrates par hectare sont en moyenne de 42,9 kg NO₃ dans la profondeur de 0-90 cm et ces niveaux sont du même ordre que ceux mesurés par Bélanger *et al.*(2003) dans les sols fertilisés avec 100 à 150 kg N/ha pour la culture de pomme de terre.

Au printemps 2008, les teneurs en nitrates étaient en moyenne de 14,38 mg/kg et elles ont varié de 37, 26 et 36 % respectivement dans les couches de 0-30 cm, 30-60 cm et 60-90 cm. Ces résultats montrent une importante diminution des nitrates dans la couche arable (0-30 cm) et dans la couche de 30-60 cm et une forte augmentation de la concentration dans la couche la plus profonde (60-90 cm). Ces données suggèrent qu'une partie importante des nitrates résiduels de la couche arable a migré dans le profil du sol par lessivage.

Tableau 6. Teneur en nitrates du sol aux profondeurs de 0-30, 30-60, 60-90 cm dans des parcelles en 2007 et 2008.

Parcelle expérimentale*	Automne 2007 (mg/kg)				Printemps 2008 (mg/kg)			
	0-30	30-60	60-90	Total	0-30	30-60	60-90	Total
	(cm)				(cm)			
1	18,30	6,24	3,17	27,71	4,52	1,82	6,73	13,07
2	21,43	8,47	2,82	32,73	6,97	6,31	7,70	20,97
3	29,00	15,78	3,36	48,14	8,38	7,02	10,04	25,44
4	34,13	17,47	5,95	57,55	4,82	3,80	3,98	12,61
5	21,00	5,93	2,60	29,53	3,62	2,14	4,62	10,38
6	15,83	6,26	3,48	25,57	4,65	4,36	5,98	14,99
7	27,40	9,77	4,44	41,61	4,44	1,33	2,84	8,61
8	11,14	4,11	8,82	24,07	6,13	3,57	6,58	16,28
9	17,57	7,65	4,54	29,77	5,12	2,70	4,00	11,82
10	14,27	6,13	3,48	23,87	6,75	3,65	2,05	12,46
11	44,37	13,15	4,47	61,98	4,21	3,45	3,89	11,55
12	26,07	8,81	4,36	39,23	5,34	4,79	4,35	14,48
Moyenne	23,38	9,94	4,29	36,81	5,41	3,74	5,23	14,39
Écart-type	11,96	5,56	3,03	17,18	2,31	2,96	2,75	6,56

* Parcelles principales pour les cultures prévues pour 2008

6.1.3. Coefficients et bilans réels d'utilisation de l'azote (¹⁵N)

Les bilans réels d'utilisation de l'engrais azoté marqué avec l'isotope ¹⁵N et appliqué sur la culture de la pomme de terre en 2007 ont été évalués à l'automne 2007 et aux printemps 2008 et 2009 (Tableaux 7, 8 et 9).

En 2007, la proportion d'azote marqué ¹⁵N récupérée dans la plante (tiges et tubercules) était de 37,2 %. Dans le sol, cette proportion de ¹⁵N était de 40,4 % (Tableau 7). Ainsi, de la quantité d'azote apporté, il ressort que l'azote récupéré dans les différentes parties de la plante et dans le sol représente 77,6 %, les pertes de l'engrais N étant de 22,4 % (Figure 1). Dans une étude effectuée en Allemagne sur la pomme de terre, Maidl *et al.* (2002) ont indiqué que la quantité d'azote prélevée par la culture variait de 36 à 68,5 % selon les années et la richesse du sol; la proportion de l'azote ¹⁵N retrouvé dans le sol se situait entre 19,5 et 24,6 % et la quantité totale de l'azote mesurée dans la plante et le sol variait de 60 à 88 %.

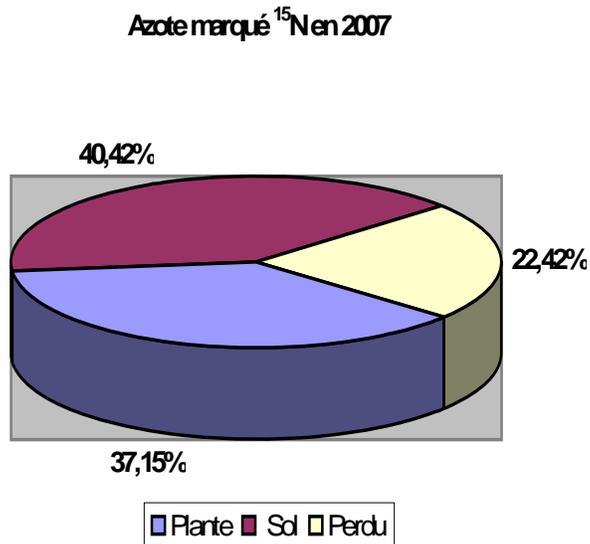
Tableau 7. Proportion (%) de ¹⁵N récupéré dans la pomme de terre et dans le sol en 2007.

Parcelle expérimentale*	¹⁵ N tiges	¹⁵ N tubercules	¹⁵ N sol			¹⁵ N total
			0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm	
1	10,35	21,01	19,82	10,76	2,63	64,56
2	14,51	23,31	31,5	5,14	1,78	76,25
3	12,92	24,26	21,25	8,86	1,48	68,76
4	12,40	20,87	20,22	20,84	6,81	81,16
5	13,65	32,12	32,79	8,31	4,21	91,08
6	13,62	25,70	29,36	10,32	7,46	86,45
7	14,96	27,90	33,92	11,36	4,44	92,59
8	13,08	21,28	18,85	3,67	2,71	59,58
9	16,01	24,76	28,52	5,29	3,32	77,9
10	11,71	23,03	14,41	3,77	2,15	55,08
11	10,60	22,44	37,7	18,19	6,37	95,3
12	12,95	22,35	28,05	11,94	6,92	82,2
Moyenne	13,06	24,09	26,36	9,87	4,19	77,58
Écart-type	3,46	5,61	14,45	9,61	3,59	23,8

* Parcelles principales pour les cultures prévues pour 2008

Les données obtenues dans cette étude sont similaires à celles qui ont été mesurées par Nyiraneza *et al.* (2010) dans des précédents avec engrais minéral, fumier et prairie. Dans cette recherche, les quantités d'azote récupérées à la récolte de maïs ont varié de 29 à 58 % selon les précédents de culture. Cependant, la proportion d'azote retrouvée dans le profil de sol (0-40 cm) au printemps était faible, variant de 8 à 18, 5 % selon les précédents. Il ressort qu'une partie de l'azote de l'engrais avait migré vers les couches inférieures du sol, comme cela a été démontré dans la présente étude.

Figure 1. Bilan réel de l'azote marqué ^{15}N sous la culture de la pomme de terre en 2007



Les résultats ont montré également que la plante a récupéré 55,5 kg de $^{15}\text{N}/\text{ha}$ et la quantité de ^{15}N résiduel était légèrement plus élevée dans le sol (60 kg $^{15}\text{N}/\text{ha}$). Des valeurs similaires ont été mesurées dans un sol de la série Sainte-Rosalie après la récolte du maïs-grain (Tran et Giroux, 1998). Cette faible quantité de ^{15}N utilisée par la pomme de terre peut s'expliquer par le fait que le sol utilisé était riche en azote (Tableau 1) et que la plante a pu ainsi prélever autant l'azote du sol que celui de l'engrais marqué. La quantité d'azote de l'engrais marqué ^{15}N non récupérée et probablement perdue par lessivage ou dénitrification représentait 22,42 % de l'engrais apporté (Tableau 7 et Figure 1), ou 33,6 kg N.

Une grande partie de l'azote récupéré dans le sol (70 %) se trouvait dans la couche arable (0-30 cm), comme cela a déjà été observé par Joern et Vitosh (1995) dans les sols cultivés en pomme de terre au Michigan. Étant donné que les cultures ne peuvent pas utiliser l'azote sous la profondeur de 0-30 cm, une importante partie de N résiduel pourrait migrer de cette couche et se perdre graduellement dans le milieu. En prenant l'exemple de 2007, les couches situées entre 30 et 90 cm contenaient 14 % de l'azote résiduel et si on additionne cette proportion aux pertes d'azote (22,4 %), les pertes potentielles d'azote pourraient représenter 36 % de la dose d'engrais apportée, soit 54 kg de N sur les 150 kg d'engrais apporté. Des pertes similaires ont été mesurées par Pradhan *et al.* (1998) dans la culture de maïs et ces auteurs les ont attribuées aux conditions climatiques.

En 2008, la proportion d'azote marqué ^{15}N récupérée dans le sol était de 43,06 %, soit 24,17 % dans la couche arable (0-30cm), 8,09 % dans la couche de 30-60 cm et 10,81 % dans la couche de 60-90 cm (Tableau 8). On remarque que de 2007 à 2008 il y a eu migration de ^{15}N vers la profondeur (60-90 cm). En effet, la quantité de ^{15}N est passée en moyenne de 4,19 à 10,81 % dans cette couche.

Tableau 8. Proportion de ¹⁵N récupérée (%) dans le sol au printemps 2008.

Parcelle expérimentale*	2008			
	0-30	30-60 (cm)	60-90	Total 0-90
1	15,70	3,21	12,66	31,57
2	26,88	6,30	10,86	44,04
3	30,75	11,99	16,42	59,16
4	24,51	9,95	5,04	39,04
5	24,10	5,91	8,38	38,39
6	23,58	6,04	7,87	37,48
7	19,46	7,0	10,52	37,88
8	25,13	8,15	12,52	45,80
9	22,55	10,90	11,24	44,68
10	26,25	11,54	9,07	46,86
11	26,35	8,55	5,69	40,59
12	24,74	7,10	19,39	51,24
Moyenne	24,17	8,09	10,81	43,06
Écart-type	6,23	4,13	5,82	11,47

* Parcelles principales pour les cultures prévues pour 2008.

En 2008, la proportion d'azote marqué ¹⁵N récupérée par les cultures de rotation et les engrais verts n'atteignait en moyenne que 0,72 % (Tableau 9). D'autres études ont également indiqué que la proportion d'azote de l'engrais récupéré en deuxième année était toujours négligeable (Schindler et Knighton, 1999, Nyiraneza *et al.* 2010). Ces phénomènes ont également été observés pour l'azote résiduel des fumiers et des lisiers, ce qui se traduisait par de très faibles coefficients d'utilisation de leur azote résiduel. Une partie de cet azote pourrait aussi se trouver sous des formes stables dans les corps microbiens, dans les tissus végétaux ou fortement retenue entre les feuillets argileux. La proportion de l'azote résiduel qui se trouve principalement sous forme organique (Reddy and Reddy, 1993) devra être décomposée pour devenir disponible à la culture suivante.

Les résultats montrent que les plantes de rotation et les engrais verts d'été ou d'automne ont utilisé plus d'azote résiduel du sol, en comparaison la pomme de terre en continu. La pomme de terre ne possède pas un système racinaire dense comme les cultures de rotation, ce qui justifie la faible proportion de récupération de l'engrais ¹⁵N. Les cultures ayant valorisé plus d'azote résiduel sont le maïs et l'orge, ainsi que la moutarde et le millet sibérien comme engrais verts d'été. Les engrais verts d'automne ont valorisé de plus faibles quantités d'azote résiduel par rapport avec les cultures de rotation et les engrais verts d'été.

Au printemps 2009, la proportion retrouvée de l'azote de l'engrais marqué ¹⁵N apporté en 2007 était en moyenne de 39,65 %, soit 27,47 % dans la couche arable (0-30cm), 9,52 % dans la couche de 30-60 cm et 2,72 % dans la couche de 60-90 cm (Tableau 9). Les quantités résiduelles de ¹⁵N retrouvées dans le sol en 2009, deux ans après l'application de l'engrais marqué ¹⁵N ont varié selon les précédents culturaux. Elles n'étaient que de 28,71 % suite à deux années de pomme de terre mais supérieures à 40 % dans les sols cultivés en céréales

(orge et avoine), moutarde et millet perlé comme engrais verts d'été et en blé comme engrais verts d'automne.

On remarque que de 2008 à 2009 il y a eu augmentation de ^{15}N dans la couche arable (0-30 cm) et dans la couche de 30-60 cm, les quantités moyennes de ^{15}N passant de 24,17 à 27,47 % et de 8,09 à 9,52 % respectivement (Tableau 9). L'augmentation d'azote résiduel ^{15}N dans la couche 0-30 cm provient probablement de la minéralisation des tissus végétaux des plantes de rotation ou des différents engrais verts. Par contre, une diminution de ^{15}N a également été observée dans la couche 60-90 cm, le niveau de ^{15}N passant de 10,18 à 2,72 %. Cette diminution importante en profondeur pourrait s'expliquer par la migration ou le lessivage de ^{15}N vers les couches les plus profondes.

Tableau 9. Proportion du ¹⁵N récupérée dans les cultures et dans le sol.

Traitements	Cultures 2008	% ¹⁵ N		
		Sol printemps 2009		
		0-30	30-60	60-90
------(cm)-----				
Pomme de terre (témoin)	0,37	16,86	9,57	2,28
Orge	0,76	31,25	11,72	4,37
Mais-grain	2,70	25,97	6,66	3,43
Avoine	0,44	33,38	8,34	0,98
Moutarde	0,81	29,21	13,76	5,29
Millet sibérien	0,79	21,58	7,16	2,05
Millet perlé	0,35	36,93	10,28	1,22
Pdt;moutarde	0,54	27,51	11,02	4,80
Pdt-blé	0,32- 0,38*	32,80	10,73	1,48
Pdt-seigle	0,39 -0,42*	19,37	5,46	3,08
Pdt-avoine	0,39-0,34*	27,36	7,07	0,90
Pdt-millet sibérien	0,36 (n.d.)	n.d.	n.d.	n.d.
Analyse de variance				
Effet traitements (Pr > F)	< 0,001	0,0004	0,0580	0,0762
Contrastes (Pr > F)				
Engrais verts d'été vs engrais verts d'automne	NS	NS	NS	NS
Engrais verts d'été vs cultures de rotation	NS	NS	NS	NS
Engrais verts d'automne vs cultures de rotation	0,0045	0,0737	NS	NS
Engrais verts + cultures de rotation vs pdt en continue	0,0294	0,0008	NS	NS

*: Proportion de ¹⁵N dans les engrais verts d'automne

6.2. ENGRAIS VERTS D'ÉTÉ ET D'AUTOMNE EN 2008

6.2.1. Caractéristiques des engrais verts d'été et d'automne, rendements en matière sèche et prélèvements en N

Les rendements en matière sèche des engrais verts d'été ont varié de 4 à 8 tonnes/ha et le millet perlé a produit plus de matière sèche. Les rendements en matière sèche des engrais verts d'automne ont varié de 1,9 à 2 tonnes/ha. Le seigle a produit plus de matière sèche et le millet sibérien n'a pas bien germé et par conséquent, la quantité de matière sèche produite n'a pas été déterminée.

Les engrais verts n'ont pas été fertilisés en azote afin d'évaluer leur potentiel de valorisation de l'azote résiduel dans les sols. Les prélèvements en azote par les engrais verts d'été ont varié de 78,5 à 94,8 kg N/ha ; le maximum ayant été mesuré pour la moutarde jaune (94,8 kg N/ha). Les prélèvements en azote des engrais verts d'automne ont varié quant à eux de 51,7 à 77,3 kg/ha et c'est la moutarde jaune qui a prélevé une plus grande quantité d'azote (77,3 kg N/ha) du sol.

Ces résultats montrent que les engrais verts d'été ont produit deux à quatre fois plus de matière sèche et également prélevé plus d'azote du sol par rapport aux engrais verts d'automne. Ceci reflète le fait que la période de croissance était plus longue pour les engrais verts d'été par rapport à celle des engrais verts d'automne. Ainsi, les engrais verts d'été ont été récoltés à pleine floraison, soit après 60 à 90 jours de croissance selon les espèces (Tableau 4), tandis que les engrais verts d'automne ont été récoltés et enfouis au sol en fin octobre après 60 jours de croissance. De plus, les conditions plus froides d'automne n'ont pas permis une croissance prolongée des engrais verts et ainsi une absorption élevée en éléments nutritifs.

Tableau 10. Rendements en matière sèche et prélèvements en N des engrais verts d'été et d'automne en 2008.

	Cultures	Rendements en m.s. (kg/ha)	Prélèvement en N (kg/ha)	C	N	C/N
Engrais verts d'été	Moutarde jaune	4 142	94,85	38,0	2,42	16
	Millet sibérien	7 206	78,51	38,7	1,23	32
	Millet perlé	8 334	83,30	40,2	1,20	34
Engrais verts d'automne	Moutarde jaune	2 070	77,32	37,2	3,87	10
	Blé	1 926	51,69	42,0	2,66	16
	Seigle	2 100	59,09	41,6	3,01	14
	Avoine	2 051	53,41	42,0	2,81	15
	Millet sibérien	n.d.*	n.d.*	---	---	---

(*) n.d. non déterminé

Les teneurs en C et en N des engrais verts d'été et d'automne ont varié entre 37 et 42 % et 1,20 à 3,9 % respectivement, selon les traitements (Tableau 10). Les teneurs en carbone étaient similaires entre les engrais verts d'été et d'automne. Le millet sibérien et le millet perlé avaient des teneurs plus faibles en azote, ce qui justifie leurs rapports C/N plus élevés. Les rapports C/N étaient supérieurs à 30 pour le millet perlé et le millet sibérien, ce qui pourrait diminuer la disponibilité de l'azote contenu dans leurs tissus pour la culture suivante. Les engrais verts

d'automne avaient des teneurs plus élevées en azote par rapport aux engrais verts d'été, et des rapports C/N plus faibles également.

De façon générale, les rendements en matière sèche des engrais verts obtenus dans la présente étude sont élevés par rapport à ceux obtenus dans une étude réalisée par Bélanger *et al.* (2007) et s'échelonnant de 1998 à 2004 (0,3 à 3,6 t/ha) sous les mêmes conditions climatiques. De même, les prélèvements en azote des engrais obtenus dans notre étude se comparaient à ceux mesurés par ces mêmes auteurs. Dans une autre étude effectuée dans la région de Québec, N'Dayegamiye et Tran (2003) ont obtenu pendant deux ans les mêmes niveaux de rendements en biomasse ainsi qu'en prélèvements en azote pour le millet japonais, le colza et la moutarde.

Les résultats obtenus dans cette présente étude montrent que même si les engrais verts n'avaient pas reçu de fertilisation en 2008, ils ont prélevé des quantités élevées d'azote en provenance du sol, variant de 53 à 95 kg N/ha selon les espèces. Ces résultats indiquent que les engrais verts ont permis de retenir d'importantes quantités d'azote dans la couche arable. Par ailleurs, on observe que les engrais verts d'automne ont présenté des prélèvements en azote tout de même importants malgré leur courte période de croissance et les faibles quantités de biomasses produites (1,9 à 2,1 t/ha).

6.3. EFFETS DES ENGRAIS VERTS D'ÉTÉ ET D'AUTOMNE EN 2009

6.3.1. Rendement total et rendement vendable

Les effets des engrais verts sur les rendements et la nutrition azotée de la pomme de terre ont été évalués en 2009. En cette année, toutes les parcelles étaient cultivées en pomme de terre de transformation (cv Snowden). Les niveaux de rendements total et vendable de la pomme de terre obtenus ont été très élevés malgré une saison marquée de conditions climatiques peu favorables à la croissance et au développement de cette culture (Tableau 11).

Sans la fertilisation azotée (0 kg N/ha), les sols ayant été soumis à des cultures d'engrais verts d'été ou d'automne, ont produit des rendements totaux en pomme de terre plus élevés (> 30 t/ha), comparativement à ceux ayant des cultures de rotation en précédents culturaux ou soumis à une culture pomme de terre en continu. Les sols soumis à des rotations avec le maïs grain ou en céréales en 2008, ont également produit des rendements totaux plus élevés en pomme de terre en 2009 par rapport à la pomme de terre en continu.

Avec la fertilisation azotée, le rendement optimal obtenu était de 31,4 t/ha pour les parcelles ayant comme précédent cultural la pomme de terre en continu en 2007 et 2008. Celui-ci était de 40 t/ha en moyenne sous les précédents des cultures de rotation conventionnelles (orge, maïs grain, avoine) et sous les précédents d'engrais verts d'été ou d'automne.

Les résultats d'analyse de variance (Tableau 11) montrent en effet des effets significatifs des précédents culturaux et des doses d'azote sur le rendement total en pomme de terre. L'interaction du précédent cultural avec la dose d'azote n'était pas significative. On peut donc en déduire qu'en l'absence de la fertilisation azotée, les cultures de rotation, les engrais verts d'été ou d'automne ont augmenté significativement le rendement total de la pomme de terre par rapport à la pomme de terre en continu. Malgré les effets importants des divers types d'engrais verts, l'effet de la dose d'azote était significatif, ceci signifie que la pomme de terre avait besoin d'un apport plus important d'engrais azoté pour combler ses besoins en azote.

Tableau 11. Rendements total et vendable et poids spécifique de la pomme de terre (cv. Snowden) en 2009.

Précédent cultural	Rendement total (t/ha)		Rendement vendable (t/ha)		Poids spécifique (kg/kg)	
	Témoin (0N)	Rendement optimal	Témoin (0N)	Rendement optimal	Témoin (0N)	Avec N
Pdt	24,7	31,4	20,4	27,2	1,0972	1,0953
Orge	27,2	43,0	26,8	38,0	1,1050	1,1003
Maïs grain	29,4	37,2	22,3	29,9	1,0986	1,0991
Avoine	35,0	45,7	31,9	41,9	1,0954	1,0951
Moutarde	36,1	44,7	33,1	39,9	1,0981	1,0972
Millet sibérien	27,0	40,0	21,4	33,7	1,1019	1,0998
Millet perlé	28,4	40,5	24,6	37,1	1,1006	1,0983
Pdt-moutarde	26,5	33,3	22,0	28,1	1,0981	1,0945
Pdt-blé	38,3	43,8	33,9	39,5	1,0659	1,0853
Pdt-seigle	29,2	42,2	20,2	37,9	1,0911	1,0926
Pdt-avoine	34,3	44,6	30,1	39,1	1,0849	1,0919
Analyse de variance						
Variables dépendantes	Rendement total		Rendement vendable		Poids spécifique	
Source	Valeur de F					
Effet des précédents culturaux	4,54**		5,20**		3,05*	
Effet de la dose	27,02**		24,24**		0,97	
Précédents culturaux*dose	0,96		0,92		0,71	
Contrastes						
Effet linéaire de la dose	93,04**		85,49**		0,31	
Effet quadratique de la dose	6,17*		2,99		2,01	
Effet cubique de la dose	8,86**		8,42**		1,27	
Engrais verts d'été vs engrais verts d'automne	0,33		0,94		13,64**	
Engrais verts d'été vs rotation conventionnelle	5,83*		10,45**		0,10	
Engrais verts d'automne vs rotation conventionnelle	3,55		5,44*		13,99**	
Engrais verts + Rotation vs pomme de terre en continue	11,74**		12,52**		0,00	

* : significatif à P < 0,05, ** : significatif à P < 0,01

Les rendements vendables ont varié de 27 à 42 t/ha selon les précédents culturaux (Tableau 11). Les analyses de variance indiquent des effets significatifs à $P < 0,01$ des précédents culturaux et des doses d'azote sur le rendement vendable. L'interaction du précédent cultural et des engrais azotés n'était pas significative sur ce paramètre.

L'analyse des contrastes (Tableau 11) indique un effet linéaire de la dose d'azote, ce qui signifie une augmentation de rendement proportionnelle aux quantités d'azote apportées. Griffin et Hesterman (1991) ont observé un effet important d'apport de l'engrais azoté sur les rendements totaux et vendables de la pomme de terre, malgré les incorporations de la vesce et du trèfle qui avaient apporté beaucoup d'azote dans le sol. Ces auteurs attribuent cette faible utilisation de l'azote des engrais verts au déficit hydrique dans le sol pendant la période de croissance de la pomme de terre. Dans la présente étude une réponse élevée aux apports d'azote a aussi été observée et ce résultat signifie une plus faible contribution en azote des engrais verts attribuable aux abondantes précipitations en 2009 qui ont probablement saturé le sol en eau, diminuant ainsi les taux de minéralisation des engrais verts.

Les rendements vendables obtenus avec les engrais verts d'été n'étaient pas significativement différents de ceux obtenus avec ceux d'automne. Par ailleurs, les engrais verts d'été ou d'automne ont produit des rendements vendables significativement plus élevés par rapport aux cultures de rotation conventionnelles. Enfin, les analyses de contrastes montrent que les systèmes de rotation avec les cultures de rotation conventionnelles (maïs-grain ou céréales) et les engrais verts d'été ou d'automne ont accru de façon significative les rendements vendables. Ces augmentations étaient en moyenne de 40 % par rapport aux rendements mesurés suite au précédent de pomme de terre.

D'autres études ont montré également que les engrais verts avaient un effet sur le rendement en pomme de terre. Une étude menée aux États-Unis pendant deux ans (2003-2004) a montré que la moutarde (*Sinapsis alba*) avait augmenté de 8 % le rendement total des tubercules comparativement à l'orge (Sexton *et al.*, 2007). L'augmentation de rendement a été également obtenue dans une étude réalisée pendant deux ans (2004-2005) par Sincik *et al.* (2008). Ces auteurs ont indiqué que la vesce commune (*Vicia sativa* L.) et la fève (*Vicia faba*, L.) deux légumineuses, avaient augmenté respectivement de 13 % et de 15 % les rendements en tubercules chez la pomme de terre comparativement au blé d'hiver. En l'absence d'engrais azoté, l'enfouissement de ces légumineuses comme engrais verts avait permis une augmentation de 36 à 38 % des rendements en pomme de terre en comparaison avec celui de la pomme de terre cultivée après le blé d'hiver (Sincik *et al.*, 2008).

De façon générale, les bénéfices des engrais verts sur les rendements en pomme de terre et les prélèvements en azote étaient similaires pour les engrais verts d'été et ceux d'automne. Mehmet *et al.* (2008) ont indiqué que les engrais verts d'été ont produit des rendements en pomme de terre plus élevés par rapport aux engrais verts d'automne. Dans la présente étude, les rendements vendables en pomme de terre ont été supérieurs à 35 t/ha avec les précédents de moutarde et millet perlé comme engrais verts d'été, et avec le blé, le seigle et l'avoine comme engrais verts d'automne. Les bénéfices des engrais verts d'été ou d'automne sur les rendements en pomme de terre et la nutrition azotée ont été plus importants avec les engrais verts en comparaison avec ceux des autres cultures de rotation conventionnelles. N'Dayegamiye et Tran (2003) ont démontré que les bénéfices des espèces non-légumineuses utilisées comme engrais verts sur les rendements et la nutrition du blé étaient attribuables à l'amélioration rapide des propriétés biologiques et de la structure du sol (Abdallahi et N'Dayegamiye, 2000). En effet, ces auteurs ont indiqué que l'utilisation du millet japonais, du colza, de la moutarde blanche et du sarrasin a augmenté les rendements en blé et les prélèvements en azote de la culture.

6.3.2. Poids spécifique de la pomme de terre

Avec ou sans apport d'azote, le poids spécifique de la pomme de terre (Tableau 11) a varié entre 1,085 et 1,100 kg/kg, indiquant que la pomme de terre produite en 2009 sur ce site était en général de bonne qualité.

Les résultats de l'analyse de variance (Tableau 11) montrent un effet significatif des précédents culturaux sur le poids spécifique de la pomme de terre en comparaison avec la pomme de terre en continu. Par ailleurs, les engrais verts d'été ont significativement augmenté le poids spécifique de la pomme de terre par rapport aux engrais verts d'automne. Le poids spécifique de la pomme de terre obtenu avec les engrais verts d'été n'était pas différent de celui obtenu avec les cultures de rotation conventionnelles. Cependant, le poids spécifique était faible avec les engrais verts d'automne par rapport aux cultures de rotation conventionnelles.

6.3.3. Prélèvement en azote

Les résultats d'analyse de variance montrent des effets significatifs à $P < 0,01$ pour les différents précédents culturaux et les doses d'azote en comparaison avec le témoin (pomme de terre en continu) (Tableau 12). Par ailleurs, l'interaction entre les précédents culturaux et les doses d'azote est également significative. Ces résultats signifient que les quantités d'azote prélevées par la pomme de terre ont été augmentées grâce aux précédents culturaux et aux apports d'engrais azotés. Comme pour les rendements en pomme de terre, les apports d'engrais azotés ont augmenté de façon linéaire les prélèvements en azote de la culture. Les analyses de contrastes montrent que les prélèvements en azote de la pomme de terre étaient significativement plus élevés dans les sols ayant reçu les engrais verts d'été ou d'automne par rapport à ceux avec cultures de rotation conventionnelles (Tableau 12).

Dans les traitements sans engrais azoté, la pomme de terre a prélevé 69,5 kg N/ha avec le précédent de pomme de terre en continu et 78,0 kg N/ha en moyenne dans les sols avec cultures de rotation conventionnelles ou avec engrais verts (Tableau 12). De façon générale, le sol a comblé environ 50 % des besoins en azote de la pomme de terre avec précédent pomme de terre, et cette contribution variait entre 60 et 70 % dans les sols qui avaient comme précédents les cultures de rotation et les engrais verts. Ces résultats indiquent que l'intégration des engrais verts d'été et des cultures de rotation conventionnelles a accru les quantités d'azote disponibles pour la culture subséquente.

6.3.4. Coefficients apparents et réels d'utilisation de l'engrais azoté

Les résultats d'analyse de variance montrent que les différents précédents culturaux ont significativement accru les coefficients apparents d'utilisation d'azote. L'interaction entre les précédents culturaux et la dose d'azote a aussi significativement influencé des coefficients d'utilisation d'azote (Tableau 12). Les analyses de contrastes indiquent également qu'il y avait un effet linéaire des doses d'azote sur les coefficients apparents d'utilisation d'azote. Ces résultats signifient que les coefficients apparents d'utilisation d'azote ont diminué proportionnellement avec les doses croissantes de l'engrais azoté (données non présentées).

Les coefficients apparents d'utilisation mesurés pour la dose de 150 kg N/ha, dose recommandée pour la pomme de terre, étaient variables selon les différents précédents culturaux (Tableau 12). Dans l'ensemble, les coefficients ont varié de 35 à 49 % sous les cultures de rotation conventionnelles et oscillaient de 38 à 58 % pour les sols ayant reçu les engrais verts d'été. Pour les engrais verts d'automne, les coefficients étaient supérieurs à 50 % pour le seigle et l'avoine mais ils étaient faibles pour la moutarde et le blé.

Les coefficients réels d'utilisation de l'azote de l'engrais ont varié de 31 à 42 % (Tableau 13) et ils étaient plus faibles que les coefficients apparents. Il est connu que les coefficients réels expriment mieux la quantité d'azote utilisée de l'engrais, alors que les coefficients apparents peuvent la surestimer (Schindler et Knighton, 1999; Stevenson *et al.* 2005). Stevens *et al.* (2005) ont indiqué que les coefficients d'utilisation d'azote pour la pomme de terre sont variables d'une année à l'autre et d'un sol à l'autre et peuvent varier entre 36 et 60 %.

Les coefficients réels d'utilisation mesurés pour la pomme de terre en 2009 étaient comparables à ceux qui ont été obtenus en 2007 (Tableau 7). Les cultures de rotation et les engrais verts se sont avérés plus efficaces à augmenter les coefficients réels d'utilisation d'azote par rapport à la pomme de terre en continu.

Tableau 12. Prélèvement en N, coefficients d'utilisation et d'efficacité de l'azote pour la pomme de terre en 2009.

Précédent cultural	Prélèvement en N (kg/ha)		Coefficient d'utilisation de N (%)	Coefficient d'efficacité de N (kg/N kg)
	Sans N	Avec 150 N		
Pomme de terre	69,4	119,3	33	193
Orge	75,7	135,6	40	228
Maïs grain	66,5	140,3	49	202
Avoine	91,8	144,1	35	226
Moutarde	75,9	142,8	45	216
Millet sibérien	59,1	146,8	58	266
Millet perlé	74,5	132,2	38	228
Pdt-moutarde	67,5	87,2	23	195
Pdt-blé	107,0	134,6	28	230
Pdt-seigle	63,5	139,7	51	231
Pdt-avoine	90,8	170,4	53	261
Analyse de variance				
Variables dépendantes	Prélèvement en N		Coefficient d'utilisation de N	Rendement vendable/kg N (kg/kg)
Source			Valeur de F	
Effet des précédents culturaux	3,91**		3,53*	5,86**
Effet de la dose	72,11**		5,06*	310,49**
Précédents culturaux*dose	1,54*		1,69*	1,73*
Contrastes				
Effet linéaire de la dose	282,64**			
Effet quadratique de la dose	3,39			
Effet cubique de la dose	2,36			
Engrais verts d'été vs engrais verts d'automne	0,13		5,22*	1,58
Engrais verts d'été vs rotation conventionnelle	8,62**		6,39*	13,93**
Engrais verts d'automne vs rotation conventionnelle	6,74*		0,17	6,59*
Engrais verts + Rotation vs pomme de terre en culture continue	9,40**		3,50	13,40**

* : significatif à P < 0,05, ** : significatif à P < 0,01

Tableau 13. Proportion du ^{15}N récupérée dans les cultures et dans le sol.

Traitements	% ^{15}N		
	Pommes de terre 2009		
	Tiges	Tubercules	Total plants
Pomme de terre	8	24	32
Orge	14	28	42
Mais-grain	7	24	31
Avoine	14	22	36
Moutarde	13	20	32
Millet sibérien	7	32	39
Millet perlé	12	22	34
Pdt;moutarde	12	16	33
Pdt-blé	19	23	42
Pdt-seigle	11	28	39
Pdt-avoine	14	20	34
Pdt-millet sibérien	n.d.	n.d.	n.d.
<i>Analyse de variance</i>			
Effet traitements (Pr > F)	0,0125	NS	0,0327
<i>Contrastes (Pr > F)</i>			
Engrais verts d'été vs engrais verts d'automne	0,0280	NS	NS
Engrais verts d'été vs cultures de rotation	NS	NS	NS
Engrais verts d'automne vs cultures de rotation	NS	NS	NS
Engrais verts + cultures de rotation vs pdt en continue	0,0400	NS	0,0476

*: Proportion de ^{15}N dans les engrais verts d'automne

6.3.5. Coefficient d'efficacité de l'azote (CEN)

Le coefficient d'efficacité (quantité de pomme de terre produite pour 1 kg d'engrais N) a varié entre 193 à 266 kg de pomme de terre par kg d'engrais N (Tableau 12). Les résultats d'analyse de variance montrent que les différents précédents culturaux et les doses d'azote ont significativement accru ($P < 0,01$) les coefficients d'efficacité de l'engrais N. De même, l'interaction entre les précédents culturaux et les doses d'azote était significative (Tableau 12). Les analyses des contrastes montrent que les engrais verts d'été et d'automne ont accru l'efficacité d'azote par rapport aux cultures de rotation conventionnelles et que ces trois systèmes de cultures ont accru l'efficacité de l'azote par rapport à la pomme de terre en continu (Tableau 12).

Les résultats obtenus sur les coefficients d'utilisation et d'efficacité de l'engrais azoté montrent que malgré les quantités d'azote apportées au sol par les enfouissements d'engrais verts, celles-ci n'ont pas été largement utilisées par la pomme de terre en 2009 en raison des conditions climatiques pluvieuses et froides qui n'ont pas été propices à la minéralisation de l'azote organique provenant des engrais verts. Ceci justifie les coefficients apparents d'utilisation d'azote élevés (40-58 %) pour les engrais azotés. Les coefficients apparents d'utilisation d'azote diminuent proportionnellement avec les quantités d'azote apportées par les engrais ou disponibles dans le sol. Ainsi, si l'azote des engrais verts avait été plus disponible, de plus faibles coefficients apparents d'utilisation de l'azote de l'engrais apporté auraient été obtenus, car la culture aurait utilisé l'azote du sol et des engrais N. Comme pour les coefficients apparents d'utilisation de l'engrais N, les coefficients d'efficacité de l'engrais N (quantité de pomme de terre produite/kg d'engrais N) étaient élevés dans les sols avec les précédents d'engrais verts et même avec des précédents de cultures de rotation conventionnelles. Il ressort que les précédents culturaux (engrais verts et cultures de rotation) ont augmenté l'efficacité de l'engrais azoté apporté, ce qui a permis d'obtenir des rendements de pomme de terre et des prélèvements d'azote élevés sous ces traitements.

En résumé, les résultats obtenus dans cette étude démontrent que les coefficients réels d'utilisation d'azote mesurés sont faibles (31 à 42 %), ce qui suggère que la culture a utilisé une importante quantité de l'azote provenant du sol. En raison des pluies abondantes pendant la saison de végétation de 2009, les coefficients d'utilisation de l'azote de l'engrais ont été faibles. Pour atteindre les rendements maxima, les doses économiques d'engrais azoté ont été par conséquent élevées (156 à 200 kg N/ha), étant parfois supérieures à la dose recommandée pour cette culture (125 à 175 kg N/ha).

Malgré cela, les cultures de rotation et les engrais verts ont augmenté significativement les coefficients d'utilisation ainsi que les coefficients d'efficacité de l'engrais azoté appliqué (kg rendement/kg azote) (Tableaux 9 et 12), en comparaison avec la pomme de terre en culture continue. Les coefficients réels d'utilisation d'azote étaient de 32 % pour la pomme de terre et ils étaient plus élevés pour les cultures de rotation et les engrais verts (31 à 42 %). Les cultures de rotation et les engrais verts ont accru de plus de 30 % en moyenne les rendements en tubercules vendables de la pomme de terre par rapport à ceux obtenus avec la pomme de terre en continu.

6.3.6. Incidence du mildiou et de la rhizoctonie sur la culture de la pomme de terre

Deux évaluations (les 12 et 20 août) de l'incidence du mildiou (*Phytophthora infestans*) ont été effectuées en 2009, dans la culture de la pomme de terre. Lors de la première évaluation, l'incidence du mildiou était de 4, 2, 2 et 3 à une échelle de 5, respectivement dans les parcelles ayant comme précédent la pomme de terre continue, les cultures de rotation conventionnelles, les engrais verts d'été et les engrais verts d'automne. Pour la deuxième évaluation, cette incidence était de 3, 2, 2 et 2 respectivement dans les parcelles avec la pomme de terre continue, les cultures de rotation conventionnelles, les engrais verts d'été et les engrais verts d'automne comme précédents culturaux (Tableau 14).

Les résultats d'analyse de variance (Tableau 14) montrent que les différents précédents culturaux ont diminué l'incidence du mildiou par rapport au témoin (pomme de terre en continu) et que la dose d'azote n'a pas eu d'effet significatif sur celle-ci. De même, l'interaction des précédents culturaux et de la dose d'azote n'est pas significative pour la première et la deuxième évaluation du mildiou. Ces résultats démontrent que l'incidence du mildiou était plus importante sous le précédent de pomme de terre en comparaison avec les précédents de cultures de rotation ou d'engrais verts.

L'incidence de la rhizoctonie (*Rhizoctonia solani*) a également été évaluée en 2009 et l'indice de sclérotification des tubercules a été déterminé (Tableau 14). L'indice de sclérotification a varié de 4 à 14 selon les précédents culturaux. Les analyses de variance montrent que les différents précédents culturaux ont significativement réduit l'incidence de la rhizoctonie, à l'exception des engrais verts d'été. Ainsi, l'indice de sclérotification était plus élevé dans les parcelles avec les engrais verts d'été comme précédent cultural en comparaison avec ce qui a été noté avec les autres précédents. Ce phénomène semble être relié aux biomasses d'engrais verts enfouis dans le sol et sur lesquels le champignon s'est bien conservé sous forme de scléroties ou en saprophyte ainsi qu'aux conditions climatiques plus humides que la normale et qui ont favorisé la croissance de ce champignon. L'absence de traitement préventif contre la rhizoctonie a également pu contribuer à la prolifération de la maladie. Par contre, Sexton *et al.* (2007) ont démontré que la diminution de la rhizoctonie sur les tubercules de la pomme de terre était associée à l'utilisation de la moutarde jaune comme engrais vert.

Tableau 14. Incidence du mildiou et indice de sclérotification de la rhizoctonie en 2009.

Précédents culturaux	1 ^{ère} évaluation*	2 ^e évaluation*	Indice de sclérotification
Pomme de terre	4	3	8
Orge	2	2	6
Mais grain	2	2	4
Avoine	1	1	11
Moutarde	2	1	10
Millet sibérien	2	2	14
Millet perlé	2	2	11
Pdt-moutarde	4	3	2
Pdt-blé	2	1	6
Pdt-seigle	2	2	17
Pdt-avoine	2	2	4
Variables dépendantes			
Source	Valeur de F		
Effet des précédents culturaux	4,93*	5,47**	10,08**
Effet de la dose	1,38	0,51	2,16
Précédents culturaux*dose	1,49	0,91	0,89
Contrastes			
Effet linéaire de la dose	0,00	0,01	5,31*
Effet quadratique de la dose	3,51	0,80	0,04
Effet cubique de la dose	1,92	1,12	2,38
Engrais verts d'été vs Engrais verts d'automne	10,60**	8,58**	15,14**
Engrais verts d'été vs rotation conventionnelle	7,61*	14,62**	23,41**
Engrais verts d'automne vs rotation conventionnelle	0,07	1,24	1,53
Engrais verts + rotation vs pomme de terre en culture continue	16,09**	18,78**	0,01

*significatif à $P < 0,05$, ** significatif à $P < 0,01$

De façon générale, les incidences du mildiou et de la rhizoctonie n'ont pas été majeures et n'ont pas affecté la production de pomme de terre. Cependant, les conditions climatiques pendant la saison de végétation de 2009 ont été très favorables à la prolifération du mildiou dans la pomme de terre. Les résultats montrent que les différents précédents culturaux (cultures de rotation et engrais verts) en ont réduit significativement la prolifération et son impact sur la croissance et le rendement de la pomme de terre.

7. CONCLUSION

Cette étude montre que pour le bilan de l'azote, les coefficients réels d'utilisation de l'engrais azoté en 2007 par la pomme de terre étaient de 37 % tandis que le pourcentage de l'azote ¹⁵N récupéré dans le sol (0-90 cm) était de 40,4 %. Ainsi, les pertes d'azote par lessivage ou dénitrification ont représenté 23 % pour cette année spécifique. Les cultures de rotation et les engrais verts d'été ont permis de conserver 46 % de l'azote résiduel de l'engrais qui auraient été perdus en culture de pomme de terre en continu. Dans le cas des engrais verts d'automne, 32 % de l'azote résiduel étaient conservés.

Même si les engrais verts n'avaient pas reçu de fertilisation en 2008, ils ont prélevé de 53 à 95 kg N/ha selon les espèces. Ces résultats indiquent que les engrais verts étaient en mesure de prélever d'importantes quantités d'azote résiduel retrouvées dans la couche arable.

Malgré les quantités d'azote retournées au sol par le biais des enfouissements d'engrais verts, celles-ci n'ont pas été largement disponibles à la pomme de terre pendant la saison suivante en 2009 en raison probablement des conditions climatiques pluvieuses et froides qui n'ont pas été propices pour la minéralisation de l'azote organique provenant de ces biomasses.

Toutefois, les différents précédents culturaux (cultures de rotation conventionnelles, engrais verts) ont accru de façon significative les rendements totaux et vendables de la pomme de terre, ainsi que les prélèvements en azote. De plus, les différents précédents culturaux ont augmenté l'efficacité de l'engrais azoté apporté à la pomme de terre.

À la lumière des résultats obtenus, il ressort que les effets bénéfiques des engrais verts n'étaient pas reliés aux retours d'azote, mais probablement à leurs effets sur certaines propriétés de sol qui ont favorisé une meilleure croissance de la pomme de terre ainsi qu'une absorption accrue de l'azote provenant de l'engrais. Pour maintenir et accroître rapidement la productivité des sols cultivés en pomme de terre, des rotations avec des engrais verts d'été et d'automne sont donc recommandées.

Les résultats de cette étude indiquent également qu'une culture continue de pomme de terre peut conduire non seulement à une baisse de rendements, mais également à l'augmentation de maladies de la culture et aux pertes de nitrates dans le sol et l'eau de drainage. Une bonne rotation des cultures incluant des engrais verts peut générer des effets bénéfiques pour cette production.

8. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abawi, G.S. and T.L. Widmer, 2000.** Impact of soil health management practices on soilborne pathogens, nematodes and root diseases of vegetable crops. *Appl. Soil Ecol.* 15: 37-47.
- Abdallahi, M. M. et A. N'Dayegamiye, 2000.** Effets de deux incorporations d'engrais verts sur le rendement et la nutrition en azote du blé (*Triticum aestivum* L.), ainsi que sur les propriétés physiques et biologiques du sol. *Can. J. Soil Sci.* 80: 81-89.
- Bélanger, B., M. Giroux, R. Morin et D. Pagé. 2007.** Effets de huit précédents culturaux sur le rendement et la fertilisation azotée de la pomme de terre (*Solanum tuberosum* L.), cv. Shepody. Rapport de recherche. IRDA, Québec. 50 p.
- Bélanger, G., N. Ziadi, J. R. Walsh, J.E. Richards and P. H. Milburn. 2003.** Residual soil nitrate after potato harvest. *J. Environ. Qual.* 32 : 607-612.
- Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ), 2003.** Guide de référence en fertilisation. 1 ère éd. 294 p.
- Creamer, N.G. et K.R. Baldwin, 2000.** An evaluation of summer cover crops for use in vegetable production systems in North Carolina. *Hort Science* 35:600-603.
- Gallandt, E. R., M. Liebman, S. Corson, G.A. Porter and S.D. Ullrich, 1998.** Effects of pest and soil management systems on weed dynamics in potato. *Weed Sci.* 46: 238- 248.
- Gasser, M.O., A. N'Dayegamiye and M.R. Laverdière, 1995.** Short-term effects of crop rotations and wood-residue amendments on potato yields and soil properties of a sandy loam soil. *Can. J. Soil Sci.* 75: 385-390.
- Gasser, M.O., M.R. Laverdière, R. Lagacé and J. Caron, 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.
- Gee, G.W. and J.W. Bauder, 1986.** Particle size analysis, p. 383-411. *Dans* A. Klute, édit., *Methods of soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods.* 2^e éd., Agronomy, Madison, 1188 p.
- Grandy, A.S., G.A. Porter and M. S. Erich. 2002.** Organic amendment and rotation crop effects on the recovery of soil organic matter and aggregation in potato cropping systems. *SSSAJ* 66: 1311-1319.
- Griffin, T.S. and O. B. Hesterman. 1991.** Potato response to legume and fertilizer sources. *Agron J.* 83: 1004-1012.
- Helmers, G.A., M.R. Langemeier and J. Atwood, 1996.** An economic analysis of alternative cropping systems for east-central Nebraska. *Am. J. Altern. Agric.* 1:153-158.
- Honeycutt, C.W., W.M. Clapham et S.S. Leach, 1996.** Crop rotation and N fertilization effects on growth, yield and disease incidence in potato. *Am. Potato J.* 73: 45-61.
- Isaac, R.A. et W.C. Johnson, 1980.** Determination of total nitrogen on plant tissues using BD-40 digestion. *J. Assoc. Off. Anal. Chem.* 50 : 98-100.
- Joern, B.C. and L. Vitosh 1995.** Influence of applied nitrogen on potato part II: recovery and partitioning of applied nitrogen. *American Journal of Potato Research* 72: 73-84.
- Maidl, F.X., H. Brunner, and E. Stickse. 2002.** Potato uptake and recovery of nitrogen ¹⁵ N-enriched ammonium nitrate. *Geoderma* 105: 167-177.

- Maynard, D.G. and Y.P. Kalra. 1993.** Nitrate and exchangeable ammonium nitrogen. P. 25-38 in M.R. Carter, ed. Soil sampling and methods of analysis. Canadian Society of Soil Science, Lewis Publishers. Boca Raton, FL.
- Mehlich, A., 1984.** Mehlich-3 soil test extractant: a modification of Mehlich-2 extractant. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 15 : 1409-1416.
- Mehmet, S., Z. M. Turan and A. T. Göskoy 2008.** Responses of potato (*Solanum tuberosum* L.) to green manure cover crops and nitrogen fertilization rates. American Journal of potato research 85: 150158.
- Sincik, M., Z.M. Turan, and A.T. Göksoy. 2008.** Response of potato (*Solanum tuberosum* L.) to green manure cover crops and nitrogen fertilization rates. Am. J. Pot Res. 85: 150-158.
- N'Dayegamiye, A. and T. S. 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 M.O. Gasser. 2007.** La contribution en azote du sol reliée à la minéralisation de la MO : facteur climatique et régions agricoles influençant les taux de minéralisation d'azote. Colloque CRAAQ-OAQ. 9 p.
- Pradhan, R., R.C. Izaaaaurralde, S. S. Malhi, and M. Nyborg. 1998.** Recovery of ¹⁵ N-labelled fertilizer applied to barley on two artificially eroded soils in north-central Alberta. Can. J. Soil Sci. 78: 377-383.
- Nyiraneza, J., M. Chantigny, A. N'Dayegamiye and M.R. Laverdière 2010.** Long-term manure application and forages reduce N fertilizer requirements of silage corn-cereal cropping systems. Agronomy Journal (in press).
- Porter, M.J., K. Davies, A.J. Rathjen, 1998.** Suppressive impact of glucosinolates in Brassica vegetative tissues on root lesion nematode *Pratylenchus neglectus*. J. Chem. Ecol., 24: 67-80.
- Reddy, G.B. and K.R. Reddy. 1993.** Fate of nitrogen-15 enriched ammonium nitrate applied to corn. Soil Sci. Soc. Am. J. 57: 111-115
- Reddy, G.B., K.R. Reddy, F.V. Schindler and R.E. Knighton. 1999.** Fate of fertilizer nitrogen applied to corn as estimated by isotopic and difference methods. Soil Sci. Soc. Am. 63: 1734-1740.
- Sexton, P., A. Plant, S.B. Johnson and J.J. Jemison, 2007.** Effect of a Mustard green manure on potato yield and disease incidence in a rainfed environment. Online. Crop Management doi ? : 10.1094/CM-2007-0122-RS.
- Sincik, M., M. Z. Turan and A. T. Göksoy, 2008.** Responses of potato (*Solanum tuberosum* L.) to green manure cover crops and nitrogen fertilization rates. Am. J. Potato Res. 85(2): 150-158.
- Schindler, F.V. and R. E. Knighton 1999.** Fate of fertilizer nitrogen applied to corn estimated by the isotopic and different methods. Soil Sci. Soc. Am. J. 63: 1734-1740.
- Snapp, S.S. et A.M. Fortuna, 2003.** Predicting nitrogen availability in irrigated potato systems. HortTechnol. 13 : 598-604.
- Snapp, S.S. and D.R. Mutch. 2003.** Cover crop choices for Michigan vegetables. Bull. E-2896. Michigan State Univ. Ext., East Lansing, MI.
- Statistiques Canada, 2010.** Production canadienne de pommes de terre. Bulletin de service, 7(3): 1-13.
- Stevens, W. B., R.G. Hoefl and R. L. Mulvaney 2005.** Fate of nitrogen-15 in a long-term rate study: II. Nitrogen uptake efficiency. Agron. J. 1046-1053.

- Tran, T.S. and M. Giroux, 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 (94): 519-532.
- Tran, T.S. and M. Giroux, 1998.** Fate of 15 N-labelled fertilizer applied to corn grown on different soil types. Can. J. Soil Sci. 597-605.
- Wyland, L.J., L.E. Jackson, W.E. Chaney, K. Klonsky, S.T. Koike and B. Kimple. 1998.** Winter cover crops in a vegetable cropping system: Impacts on nitrate leaching, soil water, crop yield, pests and management costs. Agric. Ecosyst. Environ. 59:1–17.