




- **Effets de huit précédents culturaux sur le rendement et la fertilisation azotée de la pomme de terre (*Solanum tuberosum* L.), cv. Shepody**



irda

INSTITUT DE RECHERCHE
ET DE DÉVELOPPEMENT EN
AGROENVIRONNEMENT



- **Effets de huit précédents culturels sur le rendement et la fertilisation azotée de la pomme de terre (*Solanum tuberosum* L), cv. Shepody**

B. Bélanger¹, M. Giroux¹, R. Morin² et D. Pagé¹

ISBN-978-2-922851-60-1
Dépôt légal – Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2007
Dépôt légal – Bibliothèque et Archives Canada, 2007
©IRDA

Effets de huit précédents culturaux sur le rendement et la fertilisation azotée de la pomme de terre (*Solanum tuberosum* L.), cv. Shepody

Résumé

Une expérience de longue durée sur les systèmes de rotation et la fertilisation azotée des pommes de terre a été réalisée au Centre de recherche de l'IRDA à Deschambault. Les rotations comprenaient huit précédents dont l'orge en semis pur, l'orge avec la moutarde blanche comme plante de couverture après la récolte de la céréale et l'orge grainée avec le trèfle rouge. On y retrouvait aussi le maïs-grain, le canola, le soya, le pois sec et la monoculture de pommes de terre. Le but de cette étude est de mesurer l'effet des systèmes de rotation sur le rendement de la pomme de terre et sur la fertilité azotée des sols, leur productivité et les besoins en engrais N de la pomme de terre. En 1998, les parcelles de rotation ont été mises en place et en 1999 la culture de la pomme de terre a été implantée sur l'ensemble des parcelles. Cette séquence a été répétée à trois reprises. Lorsque l'ensemble des parcelles étaient en pommes de terre, elles ont été subdivisées en cinq doses croissantes d'azote : 0, 45, 90, 135 et 180 kg N/ha.

Les rendements en pommes de terre ont été très affectés par les systèmes de rotation, par les doses d'azote et par l'interaction rotation x dose. Les nitrates dans le sol (0-30 cm) sont bien reliés aux rendements relatifs et aux prélèvements relatifs de N. Une grille permettant d'établir la dose N optimale en relation avec cet indicateur de fertilité des sols et le rendement relatif en pommes de terre a été établie. La détermination de la dose optimale N, basée sur le prélèvement relatif et le bilan de N, a également été réalisée à partir des nitrates dans le sol à la plantation.

L'analyse foliaire constitue un indicateur utile pour déterminer si les apports d'engrais N ont comblé les besoins de la pomme de terre. La teneur en N des pétioles des feuilles à la pleine floraison, associée au rendement optimal, se situait entre 900 et 1250 ppm de N-NO₃. L'indice de chlorophylle associé au rendement optimal était de 37,9 à 39,6. Le prélèvement d'azote par tonne de tubercules de pommes de terre a été d'environ 4,5 kg N/t (tiges et tubercules) au point optimal de fertilisation.

Le coefficient moyen d'utilisation de l'azote (CUN) des engrais par la pomme de terre, toutes rotations et années confondues, a été de 64,6 % pour la dose 45 kg N/ha, 55,5 % pour la dose 90 kg N/ha, 47,9 % pour la dose 135 kg N/ha et 43,2 % pour la dose 180 kg N/ha. Lorsque le niveau optimal de fertilisation est dépassé, la plante n'utilise plus efficacement l'azote et le CUN diminue, spécialement dans les sols de fertilité azotée élevée.

Mots clés : Pomme de terre, systèmes de rotation, fertilisation azotée, fertilité des sols, test des nitrates, bilan d'azote.

Table des matières

Introduction	10
Matériel et méthodes.....	11
Dispositif expérimental	11
Cultures de rotation.....	12
Culture de la pomme de terre	13
Analyse de sols et de végétaux	14
Analyses statistiques	16
Résultats et discussion	16
Rendements des cultures de rotation et teneurs en azote des engrais verts ...	16
Rendements en pommes de terre	17
Teneur et prélèvement en azote des tubercules de pommes de terre	27
Teneurs en azote des pétioles et indices de chlorophylle des feuilles de pommes de terre à la pleine floraison.....	30
Coefficient d'utilisation de l'azote des engrais	36
Indicateurs de fertilité azotée des sols et capacité de prédiction de la dose optimale d'azote	38
Bilan prévisionnel d'azote	43
Conclusions	46
Remerciements.....	47
Références bibliographiques.....	47

Liste des tableaux

Tableau 1. Description de la séquence des cultures, Deschambault, 1998 à 2005.	12
Tableau 2. Cultivars, dates, taux de semis et dates de récolte des cultures de rotation, Deschambault, 1998, 2000, 2002 et 2004.	12
Tableau 3. Dates de plantation, de buttage et de récolte de la pomme de terre, cv. Shepody, Deschambault, 1999, 2001, 2003 et 2005.	13
Tableau 4. Rendement des cultures de rotation, Deschambault, 1998, 2000, 2002 et 2004.	17
Tableau 5. Rendement en matière sèche des engrais verts en association avec la culture de l'orge, Deschambault, 1998, 2000, 2002 et 2004.	17
Tableau 6. Analyse de la variance de l'effet de différents précédents culturaux (P) et du niveau de fertilisation azotée (N) sur les rendements en pommes de terre, cv. Shepody, Deschambault, 1999, 2001, 2003 et 2005.	18
Tableau 7. Effet du précédent cultural et de la dose d'azote sur le rendement total de pommes de terre, cv. Shepody, Deschambault, 1999.	19
Tableau 8. Fonctions de production de pommes de terre pour le rendement total en t/ha selon différents précédents culturaux et cinq niveaux d'azote, cv. Shepody, Deschambault 1999.	20
Tableau 9. Effet du précédent cultural et de la dose d'azote sur le rendement total de pommes de terre, cv. Shepody, Deschambault, 2001.	21
Tableau 10. Fonctions de production de pommes de terre pour le rendement total selon différents précédents culturaux et cinq niveaux d'azote, cv. Shepody, Deschambault 2001.	22
Tableau 11. Effet du précédent cultural et de la dose d'azote sur le rendement total de pommes de terre, cv. Shepody, Deschambault, 2003.	22
Tableau 12. Fonctions de production de pommes de terre pour le rendement total selon différents précédents culturaux et cinq niveaux d'azote, cv. Shepody, Deschambault 2003.	23
Tableau 13. Effet du précédent cultural et de la dose d'azote sur le rendement total de pommes de terre, cv. Shepody, Deschambault, 2005.	24
Tableau 14. Fonctions de production de pommes de terre pour le rendement total selon différents précédents culturaux et cinq niveaux d'azote, cv. Shepody, Deschambault 2005.	24
Tableau 15. Rendement en pommes de terre selon les différentes cultures de rotation, toutes les doses d'azote confondues, cv. Shepody, Deschambault 1999, 2001, 2003 et 2005.	26
Tableau 16. Rendement en pommes de terre selon les différents niveaux de N, tous les systèmes de rotation confondus, cv. Shepody, Deschambault 1999, 2001, 2003 et 2005.	26
Tableau 17. Quantité de pommes de terre rejetées pour difformités et fissures lors du classement selon les différents niveaux de N, cv. Shepody, Deschambault 1999, 2001, 2003 et 2005.	26

Tableau 18. Analyse de la variance de l'effet de différents précédents culturaux et du niveau de fertilisation azotée sur le rendement en matière sèche, la teneur en N et le prélèvement en azote des tubercules de pommes de terre, cv. Shepody, Deschambault, 1999, 2001 et 2003.....	28
Tableau 19. Effet du précédent cultural sur le prélèvement en azote des tubercules de pommes de terre, toutes les doses d'azote confondues, cv. Shepody, Deschambault, 1999, 2001 et 2003.....	29
Tableau 20. Effet de la dose d'azote sur le prélèvement en azote des tubercules de pommes de terre, cv. Shepody, tous les systèmes de rotation confondus, Deschambault, 1999, 2001 et 2003.	29
Tableau 21. Analyse de la variance de l'effet de différents précédents culturaux et du niveau de fertilisation azotée sur un indice de chlorophylle (IC) des feuilles et le contenu en nitrates des pétioles de pommes de terre, à la pleine floraison, cv. Shepody, Deschambault, 1999, 2001 et 2003.	32
Tableau 22. Effet du précédent cultural sur le contenu en nitrates des pétioles de pommes de terre à la pleine floraison, toutes doses d'azote confondues, cv. Shepody, Deschambault, 1999, 2001 et 2003.	33
Tableau 23. Effet de la dose d'azote sur le contenu en nitrates des pétioles de pommes de terre à la pleine floraison, tous systèmes de rotation confondus, cv. Shepody, Deschambault, 1999, 2001 et 2003.	33
Tableau 24. Niveau de nitrates des pétioles et indice de chlorophylle des feuilles au moment de la pleine floraison qui permettent d'atteindre un rendement optimal et maximal, cv. Shepody, Deschambault, 1999, 2001 et 2003.....	34
Tableau 25. Niveaux de N-NO ₃ à maintenir dans les pétioles de pommes de terre afin d'obtenir un rendement adéquat selon différentes institutions.	34
Tableau 26. Effet du précédent cultural sur l'indice de chlorophylle des feuilles de pommes de terre au moment de la pleine floraison, toutes les doses d'azote confondues, cv. Shepody, Deschambault, 1999, 2001 et 2003.....	35
Tableau 27. Effet de la dose d'azote sur l'indice de chlorophylle des feuilles de pommes de terre au moment de la pleine floraison, tous les systèmes de rotation confondus, cv. Shepody, Deschambault, 1999, 2001 et 2003.....	36
Tableau 28. Coefficient d'utilisation de l'azote des engrais N (CUN) par la pomme de terre, cv. Shepody, Deschambault, moyenne de 1999, 2001 et 2003.....	37
Tableau 29. Coefficient d'utilisation de l'azote des engrais N (CUN) par la pomme de terre, cv. Shepody, Deschambault 1999.	37
Tableau 30. Coefficient d'utilisation de l'azote des engrais N (CUN) par la pomme de terre, cv. Shepody, Deschambault 2001.	37
Tableau 31. Coefficient d'utilisation de l'azote des engrais N (CUN) par la pomme de terre, cv. Shepody, Deschambault 2003.	37
Tableau 32. Analyse de la variance et matrice de corrélations linéaires simples entre les rendements relatifs, les prélèvements relatifs d'azote, la dose optimale de N, la teneur en nitrates des sols, la teneur en nitrates des pétioles et l'indice de chlorophylle (IC) à la pleine floraison dans les parcelles sans engrais N, cv. Shepody, Deschambault, 1999.	38

Tableau 33. Analyse de la variance et matrice de corrélations linéaires simples entre les rendements relatifs, les prélèvements relatifs d'azote, la dose optimale de N, la teneur en nitrates des sols, la teneur en nitrates des pétioles et l'indice de chlorophylle (IC) à la pleine floraison dans les parcelles sans engrais N, cv. Shepody, Deschambault, 2001.	39
Tableau 34. Analyse de la variance et matrice de corrélations linéaires simples entre les rendements relatifs, les prélèvements relatifs d'azote, la dose optimale de N, la teneur en nitrates des sols, la teneur en nitrates des pétioles et l'indice de chlorophylle (IC) à la pleine floraison dans les parcelles sans engrais N, cv. Shepody, Deschambault, 2003.	39
Tableau 35. Analyse de la variance et matrice de corrélations linéaires simples entre les rendements relatifs, la dose optimale de N et la teneur en nitrates des sols dans les parcelles sans engrais N, cv. Shepody, Deschambault, 2005.....	40
Tableau 36. Doses optimales d'azote selon les rendements relatifs (RR) en pommes de terre et la teneur en N-NO ₃ des sols à la plantation et au buttage, cv. Shepody, Deschambault 1999.	43
Tableau 37. Comparaison des grilles de fertilisation azotée de la pomme de terre en fonction du niveau de N-NO ₃ mesuré dans la strate 0-30 cm du sol au moment de la plantation et au buttage.	43
Tableau 38. Doses optimales d'azote déterminées par la méthode du bilan prévisionnel selon les prélèvements relatifs (PR) en pommes de terre et la teneur en N-NO ₃ des sols à la plantation. ..	45

Liste des figures

Figure 1. Rendement total en t/ha de pommes de terre selon la dose d'azote pour différents précédents culturaux, cv. Shepody, Deschambault, 1999.	20
Figure 2. Rendement total en t/ha de pommes de terre selon la dose d'azote pour différents précédents culturaux, cv. Shepody, Deschambault, 2001.	21
Figure 3. Rendement total en t/ha de pommes de terre selon la dose d'azote pour différents précédents culturaux, cv. Shepody, Deschambault, 2003.	23
Figure 4. Rendement total en t/ha de pommes de terre selon la dose d'azote pour différents précédents culturaux, cv. Shepody, Deschambault, 2005.	24
Figure 5. Rendement total en t/ha de pommes de terre selon la dose d'azote pour différents précédents culturaux, cv. Shepody, Deschambault, 1999, 2001, 2003 et 2005.	25
Figure 6. Relation entre le contenu en NO_3 des pétioles des feuilles et les doses d'azote pour l'ensemble des systèmes de rotation, au stade pleine floraison de la pomme de terre, Deschambault, 2001.	31
Figure 7. Relation entre le contenu en NO_3 des pétioles des feuilles et les doses d'azote pour l'ensemble des systèmes de rotation, au stade pleine floraison de la pomme de terre, Deschambault, 2003.	31
Figure 8. Relation entre l'indice de chlorophylle des feuilles et les doses d'azote pour l'ensemble des systèmes de rotation, au stade pleine floraison de la pomme de terre, Deschambault, 1999.	35
Figure 9. Relation entre la dose optimale d'azote (N_{opt}) de la pomme de terre et le rendement relatif (R.R.), Deschambault, 1999.	41
Figure 10. Relation entre le rendement relatif (R.R.) de la pomme de terre et la teneur en nitrates des sols à la plantation, Deschambault, 1999.	41
Figure 11. Relation entre le rendement relatif (R.R.) de la pomme de terre et la teneur en nitrates des sols au buttage, Deschambault, 1999.	42
Figure 12. Relation entre le prélèvement relatif (P.R.) de la pomme de terre et la teneur en nitrates des sols à la plantation, Deschambault, 1999.	44

Introduction

Les rotations en agriculture sont reconnues comme une pratique incontournable si l'on veut maintenir la productivité des sols et la qualité des productions (Bullock 1992, Honeycutt et al. 1995, Karlen et al. 1994, McDole et Dallimore 1978, O'Sullivan 1978, Vereijken et Van Loon 1991).

Selon Soltner (1995), la pomme de terre ne devrait pas revenir plus d'une année sur quatre dans un même champ. Dans un document de références générales sur les systèmes de rotation au Canada Atlantique, produit par le Centre de conservation des sols et de l'eau de l'est du Canada (1995), il est mentionné que parmi les rotations évaluées, celles de trois ans (pomme de terre-céréales-fourrage) affichent la meilleure performance économique et environnementale. Les données du portrait agroenvironnemental des fermes du Québec (1999), nous indiquent que ces niveaux ne sont pas toujours atteints. Dans certaines zones, on compte jusqu'à 12,5 % des surfaces en monoculture de pommes de terre. Dans les grandes régions de production, souvent celles près des grands centres de consommation, la pomme de terre occupe plus de 50 % des superficies des fermes où l'on pratique cette culture. C'est donc que le ratio 1:1 (une année de pomme de terre suivie d'une année d'une autre culture) n'est pas atteint.

La pomme de terre, qui est reconnue comme une production qui demande un travail important du sol et une forte fumure azotée, exerce une forte pression sur la matière organique des sols. Selon l'Inventaire des problèmes de dégradation des sols agricoles du Québec (1990), on observe une diminution de la teneur en matière organique de plus de 50 % dans les sols sous monoculture de pommes de terre.

Par la rotation des cultures, on affecte aussi les propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols. Honeycutt (1995) a démontré que la conductivité hydraulique des sols s'améliore en situation de rotations. Les études de Angers et Giroux (1996) ont démontré que la rotation modifie la structure, la densité apparente et la porosité des sols selon la quantité et la composition des résidus de culture. Au Québec, les travaux sur les rotations de Gasser et al. (1995) attribuent le bénéfice des pratiques de rotation à une meilleure rétention en eau des sols. Plusieurs auteurs (Bullock 1992, Easton et al. 1992, Gasser et al. 1995, Li et al. 1999, McDole et Dallimore 1978) ont mesuré des augmentations de rendement des pommes de terre en situation de rotation par rapport à une monoculture. Entre autres, O'Sullivan (1978) a mesuré des augmentations de rendement jusqu'à 10,5 t/ha de pommes de terre pour une rotation de deux ans avec le maïs.

L'éventail des cultures testées ou recommandées en rotation avec la pomme de terre est important (Comité de la pomme de terre de l'Atlantique 1987, CPVQ 1996, Glynne 1965, Honeycutt et al. 1995, Syndicat des producteurs de pommes de terre de la région de Québec 1994). On y retrouve principalement les céréales à paille, le maïs, la luzerne, les trèfles, les graminées fourragères, le pois, le soya et plus récemment le canola.

Avec la mise en place de systèmes de production axés sur les rotations des cultures, la gestion de l'azote présente un défi important (Griffin et Hesterman 1991). Au Québec, les travaux de Giroux (1982) ont permis de préciser les besoins en azote de la pomme de terre. Ils sont en moyenne de 180 kg/ha, variant de 130kg/ha à 210 kg/ha selon les types de sols et la teneur en matière organique. À lui seul, le sol peut contribuer de 18 à 56 % de ces besoins. Pour sa part,

Bélangier et al. (2000) ont démontré qu'au Nouveau-Brunswick, pour le cultivar Shepody, le besoin en azote varie de 150 à 250 kg/ha et qu'une recommandation spécifique champ par champ est requise pour optimiser la fertilisation azotée.

La culture qui précède une production de pommes de terre peut avoir une forte influence sur sa fertilisation azotée. Porter et Sisson (1991) ont démontré qu'on peut créditer jusqu'à 75 kg/ha de N à une culture de pommes de terre lorsqu'elle est précédée d'un trèfle rouge. Westra et al. (1995) proposent une valeur de 25 kg/ha pour un trèfle. On retrouve dans le guide de référence en fertilisation du CRAAQ (2001) un tableau qui précise la contribution en azote des précédents culturaux. Les difficultés à ajuster la fertilisation azotée en fonction de l'historique des champs ont amené plusieurs chercheurs à vouloir développer des indicateurs de fertilité des sols et à bâtir des grilles de fertilisation azotée en fonction de la richesse des sols.

C'est dans ce contexte que nous proposons comme hypothèse que la rotation des cultures dans une production de pommes de terre permet d'augmenter les rendements tout en réduisant le besoin en engrais azoté. Cette recherche vise également à proposer des outils afin d'optimiser cette fertilisation. Entre autres, une grille de fertilisation azotée de la pomme de terre en fonction des teneurs en nitrates des sols à la plantation et au buttage est proposée. Aussi, des niveaux de nitrates à maintenir dans les pétioles des feuilles et des indices relatifs à la chlorophylle à mesurer au feuillage en cours de culture sont également proposés.

Matériel et méthodes

Dispositif expérimental

Cette étude a été réalisée à la ferme expérimentale de l'IRDA à Deschambault. Le sol utilisé est un loam sableux fin de la série Batiscan (podzol humo-ferrique) : 5 % d'argile, 22 % de limon et 73 % de sable. Au début de l'expérimentation, la teneur moyenne des parcelles en matière organique était de 3,2 %. À l'automne 1997, avant la mise en place des parcelles de recherche et à l'automne de chaque année, les sols ont été analysés par la méthode Mellich-3 pour déterminer leur contenu en P, K, Ca et Mg. La teneur du sol en ces éléments était respectivement de 110, 122, 485 et 33 mg/kg. Le pH à l'eau se situait à 5,5 et le pH tampon était de 6,5. Pour ces éléments, la fertilisation des cultures de rotation et de la pomme de terre s'effectuait à partir des grilles de fertilisation du Conseil des productions végétales du Québec (CPVQ 1996) et du Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ 2001).

Toujours à l'automne 1997, la période précédant la mise en place de la première séquence de rotation, de la pierre à chaux (CALCO®), avec un indice de valeur agricole de 81 %, a été appliquée sur l'ensemble des parcelles à l'exception du témoin (monoculture de pommes de terre). La dose appliquée a été de 4,65 t/ha pour un pH visé de 6,0.

L'essai était disposé selon un plan en tiroirs systématiques (split block) avec quatre répétitions. Les parcelles principales, disposées selon un plan en blocs complets, étaient constituées de huit traitements dont sept étaient les différentes cultures de rotation et un huitième, la monoculture de pommes de terre (absence de rotation).

Les cultures de rotation retenues en parcelles principales sont :

- Orge en semis pur
- Orge en semis pur et plante de couverture (moutarde blanche) après la récolte de l'orge
- Orge grainée avec le trèfle rouge au moment du semis de la céréale
- Canola
- Soya
- Pois sec
- Maïs-grain
- Pomme de terre en continu (témoin sans rotation)

La séquence des rotations dans le temps est présentée au tableau 1.

Tableau 1. Description de la séquence des cultures, Deschambault, 1998 à 2005.

Année	Séquence des cultures
1998	Cultures de rotation
1999	Pomme de terre
2000	Cultures de rotation
2001	Pomme de terre
2002	Cultures de rotation
2003	Pomme de terre
2004	Cultures de rotation
2005	Pomme de terre

Cultures de rotation

La dimension des parcelles principales était de 12,2 m par 7,5 m. Les cultivars utilisés, les dates et les taux de semis, de même que les dates de récolte des cultures de rotation sont résumés au tableau 2.

Tableau 2. Cultivars, dates, taux de semis et dates de récolte des cultures de rotation, Deschambault, 1998, 2000, 2002 et 2004.

Culture	Cultivar	Taux de semis	Date de semis				Date de récolte			
			1998	2000	2002	2004	1998	2000	2002	2004
Orge	Chapais	170 kg/ha	7 mai	3 mai	2 mai	10 mai	5 août	14 août	6 août	17 août
Orge +	Chapais	120 kg/ha ⁽¹⁾	11 mai	4 mai	6 mai	10 mai	5 août	14 août	6 août	17 août
Trèfle	Azur	6,7 kg/ha	11 mai	4 mai	6 mai	10 mai	7 oct	13 oct	21 oct	7 oct
Orge +	Chapais	170 kg/ha	7 mai	3 mai	2 mai	10 mai	5 août	14 août	6 août	17 août
Moutarde	---	11 kg/ha	7 août	17 août	13 août	20 août	7 oct	13 oct	21 oct	7 oct
Canola	Hyola 420 ⁽²⁾	5,7 kg/ha	5 mai	4 mai	9 mai	12 mai	1 sept	29 août	26 août	1 sept
Soya	Aquilon ⁽³⁾	115 kg/ha	12 mai	16 mai	23 mai	20 mai	24 sept	12 oct	14 sept	29 sept
Maïs-grain	Pride K 108 ⁽⁴⁾	74 000 grains/ha	12 mai	16 mai	23 mai	11 mai	16 oct	31 oct	22 oct	25 oct
Pois sec	Grandé ⁽⁵⁾	185 kg/ha	11 mai	15 mai	13 mai	12 mai	11 sept	29 août	26 août	20 août
Pomme de terre	Shepody	33 cm ⁽⁶⁾	14 mai	17 mai	24 mai	12 mai	22 sept	26 sept	26 sept	30 sept

(1) taux de semis de 170 kg/ha en 2002 et 2004, (2) cultivar Hyola 401 en 2002 et 2004, (3) cultivar Nortman en 2002, (4) hybride K095 en 1998, (5) cultivar Carneval en 2002 et 2004, (6) distance de plantation sur le rang

Les semis ont été réalisés avec des équipements que l'on retrouve sur les fermes du Québec. Un semoir Brillon a été utilisé pour le semis du canola (*Brassica campestris L.*). Pour l'orge (*Hordeum vulgare L.*), le pois (*Pisum sativum var. arvense L.*) et le soya (*Glycine max (L. Merrill)*), un semoir conventionnel à céréales de marque International avec des rangs espacés de 18 cm a été utilisé. Lorsque le traitement nécessitait l'implantation du trèfle (*Trifolium pratense L.*) au même moment que l'orge, le compartiment réservé à ce type de graines, sur le même semoir, a été utilisé. Pour l'implantation de la moutarde blanche (*Brassica hirta Moench*) après la récolte de l'orge, le semoir à grains a de nouveau été utilisé. Pour le maïs-grain (*Zea mays L.*), nous avons eu recours à un semoir à plaques de 18 trous, à deux rangs espacés de 76 cm. Après le semis, un rouleau était passé sur les parcelles afin de bien tasser le sol sur les graines. Le trèfle rouge, le soya et le pois ont été inoculés avec des rhizobiums spécifiques à chaque espèce. Dans le cas des parcelles de pommes de terre (témoin), les tubercules entiers étaient plantés à la main à une distance de 33 cm sur le rang après qu'un coutre ouvre sillon à quatre rangs espacés de 93 cm eut épandu l'engrais minéral. Les rangs étaient refermés manuellement à l'aide de râteaux.

La fertilisation en N, P, K, Mg et la protection des cultures étaient faites selon les recommandations du CPVQ (1996) et du CRAAQ (2001). Les engrais ont été appliqués à la volée avec un appareil Vicon, sauf pour le maïs-grain et la pomme de terre où des applications en bandes ont été faites.

Les engrais verts et les résidus de cultures ont été enfouis au chisel le 29 octobre 1998, le 7 novembre 2000, le 4 novembre 2002 et à la charrue à rasette le 3 novembre 2004. Le chisel a également été utilisé pour le travail primaire du sol à l'automne, les années où l'ensemble des parcelles étaient en pommes de terre. C'est aussi après ce travail du sol, qu'un échantillon composite de chaque parcelle principale était prélevé à une profondeur de 0-20 cm pour une analyse de P, K, Ca, Mg et B par la méthode Mehlich-3.

Culture de la pomme de terre

Après une année de cultures de rotation, l'ensemble des parcelles expérimentales étaient en pommes de terre (*Solanum tuberosum L.*) cv. Shepody. Avant la plantation, une herse à ressort de type vibroculteur était passée.

Les dates de plantation, de buttage et de récolte sont résumées au tableau 3. Les pommes de terre ont été plantées à la main en 1999 et 2001, tel que décrit précédemment. En 2003 et 2005, la même technique a été utilisée pour ouvrir les sillons et placer l'engrais et un planteur manuel Kverneland UN-1141 est venu faciliter la mise en place des tubercules dans le sillon et leur recouvrement par le sol.

Tableau 3. Dates de plantation, de buttage et de récolte de la pomme de terre, cv. Shepody, Deschambault, 1999, 2001, 2003 et 2005.

Année	Date de plantation	Date du buttage	Date de récolte
1999	12 mai	23 juin	22 septembre
2001	16 mai	28 juin	24 septembre
2003	28 mai	3 juillet	22 septembre
2005	12 mai	30 juin	19 septembre

Des tubercules entiers du cultivar Shepody d'un poids variant de 43 à 113 g étaient plantés à une distance sur le rang de 33 cm. On mesurait 93 cm entre les rangs. Chaque parcelle principale comptait 10 rangs de pommes de terre, plus deux rangs de garde. Les parcelles n'étaient pas irriguées.

Les doses d'azote apportées à la pomme de terre en parcelles secondaires étaient de 0, 45, 90, 135, 180 kg N/ha. Cette graduation dans les quantités visait à déterminer la dose optimale d'engrais minéral azoté pour une production optimale de pommes de terre en fonction des différents précédents culturaux. Pour chaque dose de N, on comptait deux rangs de pommes de terre de 7,5 m de long. Pour les doses d'engrais azoté de 45 et 90 kg N/h, la quantité totale était appliquée en bandes au moment de la plantation. Pour les doses 135 et 180 kg N/ha, un premier 90 kg N/ha étaient appliqués à la plantation et le reste en bandes au moment du buttage. Toute la fumure azotée était sous forme de nitrate d'ammonium. Les doses de phosphore, de potassium, de magnésium et de bore ont été établies en fonction des analyses de sol et des recommandations du CPVQ (1996) et du CRAAQ (2001). Le tout était appliqué en bandes au moment de la plantation.

La dose optimale d'azote a été établie à partir des fonctions de production qui relient le rendement à la dose d'azote selon un modèle quadratique lorsque celui-ci s'applique. Nous avons procédé à l'étude de la dérivée de la fonction en considérant une productivité limite de 6 kg de pommes de terre pour rentabiliser l'application de 1 kg de N.

La gestion des mauvaises herbes, du doryphore et du mildiou a été faite à partir des recommandations du CRAAQ et du Réseau d'avertissements phytosanitaires (RAP).

Le rendement total en pommes de terre a été déterminé en pesant la récolte de chaque unité expérimentale après avoir lavé les tubercules. Le rendement vendable a été obtenu en se basant sur les exigences de l'Agence canadienne d'inspection des aliments en ce qui concerne le calibre des variétés longues. Les tubercules dont le diamètre était inférieur à 51 mm ont été éliminés sauf si le tubercule mesurait plus de 89 mm de longueur. Dans ce cas, le diamètre devait être de 44 mm et plus. Les tubercules difformes étaient également éliminés. Ce pré-classement a été fait manuellement et le classement par catégorie à l'aide d'un classeur mécanique. Les tubercules dont le diamètre était compris entre 51 et 89 mm étaient classés Canada No 1. Pour la catégorie Canada N° 1 grosse, nous avons retenu un diamètre de 89 à 114 mm.

Analyse de sols et de végétaux

Au printemps, avant la plantation de la pomme de terre, pour connaître la teneur des sols en azote minéral (N-NO_3^- et N-NH_4^+), un échantillon composite de 10 carottes était pris à une profondeur de 0-30 cm. Chaque parcelle principale était échantillonnée. Un second échantillonnage de sol était fait à la même profondeur avant le buttage, au moment de l'apparition des boutons floraux, dans les parcelles secondaires où il n'y avait pas eu d'application d'azote à la plantation (0 N). Les teneurs en azote minéral du sol ont été déterminées par colorimétrie sur un Technicon autoanalyseur suite à une extraction avec du KCl 2N.

La détermination de la concentration en N des engrais verts et des tubercules a été effectuée par digestion Kjeldhal à 400 °C pendant 1 heure, avec de l'acide sulfurique et séléinique additionné de peroxyde d'hydrogène. L'azote a ensuite été dosé par colorimétrie automatique (Isaac et Johnson 1980). L'apport en azote des engrais verts a été obtenu en multipliant les rendements en matière sèche par la teneur en azote.

Durant la saison de croissance de la pomme de terre, les indices de chlorophylle du feuillage et le contenu en nitrates des pétioles des feuilles ont été mesurés. Ces niveaux ont été évalués à quatre reprises au cours de la saison : au début de la floraison, à la pleine floraison et à un intervalle de sept jours par la suite. Les analyses des nitrates ont été faites à l'aide de

l'appareil Nitratecheck. Cette méthode a été retenue pour sa rapidité et son étroite corrélation avec les analyses classiques de laboratoire (Berry et Thicoipe 1993). Le chlorophyllemètre Spad 502 de la compagnie Minolta a été utilisé pour les mesures d'indice de chlorophylle. Les méthodes suivies pour l'utilisation de ces appareils ont été adaptées de Tremblay et al. (2001).

Pour la détermination des nitrates, dans chaque unité expérimentale, un échantillon était composé d'une dizaine de pétioles de nouvelles feuilles matures (5^e feuille) prélevées au hasard sur autant de plants. Les pétioles étaient coupés en longueur de trois centimètres. De l'ensemble de ces morceaux, de la sève était extraite à l'aide d'un presseur. Le dosage était obtenu en déposant une goutte de solution de sève sur la bandelette (valeur Y1). On recommençait la procédure avec un second échantillon de la même sève pour l'obtention des valeurs Y2. Les sèves ont été diluées, généralement par un facteur de 25, pour ramener leurs concentrations dans les limites de détection de l'appareil. Le Nitratecheck a été calibré à l'aide d'une solution d'étalonnage de 100 ppm de NO₃ (valeur C). Une calibration était refaite à chaque fois qu'on changeait de lot de bandelettes. Le chiffre fourni par l'appareil constitue une mesure relative; il est donc nécessaire de le corriger selon la lecture obtenue lors de la calibration (C). L'équation pour obtenir la concentration en NO₃ (ppm) de la sève est la suivante :

$$\blacksquare \quad X = Y * 100/C$$

On doit par la suite multiplier «X» par le facteur de dilution. Pour obtenir une valeur de N exprimée en N-NO₃, il faut diviser la concentration de NO₃ par un facteur de 4,43. En 1999, pour l'échantillonnage du 13 juillet, une partie de la sève a été acheminée au laboratoire pour une analyse classique afin de mesurer la corrélation et la concordance entre les deux méthodes.

Pour l'indice de chlorophylle, dans chaque unité expérimentale, la donnée provenait de la moyenne de lecture de 10 folioles sur de nouvelles feuilles matures (5^e feuille) échantillonnées au hasard. La mesure est obtenue en pinçant une foliole avec l'appareil Spad. Les mesures ont été faites directement au champ, la même journée que l'échantillonnage des pétioles, mais pas nécessairement sur les mêmes feuilles.

Les prélèvements en N/ha de la récolte ont aussi été calculés. La teneur en N des tubercules multipliée par le rendement total exprimé sur une base de matière sèche nous a fourni cette information. Le coefficient d'utilisation de l'azote (CUN) des engrais est une autre donnée qui a été déterminée. Pour chacune des doses d'azote, dans chacun des systèmes de rotation, la différence entre le prélèvement de la parcelle avec N moins le prélèvement de la parcelle sans N, divisé par la dose N correspondante, donne le CUN (Giroux et al. 2000).

$$\blacksquare \quad \text{CUN} = (\text{Prélèvement avec N} - \text{Prélèvement sans N})/\text{dose N} * 100$$

Les rendements en pommes de terre exprimés en t/ha sont également présentés sous forme de rendements relatifs (RR). Ces derniers correspondent au rendement du témoin sans N/rendement maximal calculé avec N x 100. Le RR fournit une indication relative de la réponse des plants de pommes de terre aux apports d'engrais N et a servi à calibrer les indicateurs de fertilité azotée des sols. Les prélèvements en N/ha ont également été exprimés sous la forme de prélèvements relatifs (PR). Le PR correspond au prélèvement en N du témoin sans N/prélèvement N maximal calculé avec N x 100 (Giroux et Lemieux 2006). Ces valeurs ont fourni une indication relative de la capacité des sols à fournir l'azote à la pomme

de terre et ont servi à calibrer les indicateurs de fertilité des sols utilisés dans l'approche du bilan prévisionnel N.

Le bilan prévisionnel d'azote peut être utilisé comme outil de gestion de la fertilisation azotée. Il permet d'évaluer les besoins en azote de la plante associés à un rendement visé et nous amène à préciser la proportion de l'azote qui sera comblée par le sol et par les engrais. Dans le cadre de cette recherche, un tel exercice a été réalisé. Les équations utilisées dans les calculs sont tirées de Giroux et Lemieux (2006).

- Besoin N = Fourniture N (sol) + fourniture N (engrais)
- Besoin N = Rendement visé x prélèvement N/tonne
- Fourniture N (sol) = Besoin N x prélèvement relatif (PR)
- Rendement visé x prélèv. N/tonne = (Besoin N x PR) + dose N x CUN

Analyses statistiques

Les rendements en pommes de terre ont été soumis à l'analyse de la variance selon un dispositif en plan subdivisé en tiroirs systématiques (split block) avec les précédents culturaux en facteur principal et les doses d'azote en facteur secondaire. Les traitements statistiques ont été effectués selon la procédure GLM de SAS (SAS Institute, Inc. 1985).

Une matrice des corrélations linéaires simples a été établie entre les rendements relatifs, les prélèvements relatifs, la dose optimale de N, les teneurs en nitrates des sols et des pétioles et l'indice de chlorophylle. Trente-deux données pour chacun de ces paramètres (8 rotations x 4 répétitions) ont servi pour établir les coefficients de corrélation entre ces valeurs.

Une évaluation de la capacité des indicateurs de fertilité à prédire la dose optimale N de la pomme de terre a été réalisée à partir de leur relation avec les rendements relatifs. Une grille de fertilisation de la pomme de terre a été déterminée à partir des résultats des différents indicateurs de fertilité azotée sélectionnés. Une évaluation de la dose optimale N, déterminée par un bilan prévisionnel N et basée sur les relations entre les indicateurs de fertilité et les prélèvements relatifs, a également été réalisée.

Résultats et discussion

Rendements des cultures de rotation et teneurs en azote des engrais verts

Dans l'ensemble, les cultures de rotation ont donné de bons rendements (tableau 4). Au fil des années, différents événements sont venus affecter les rendements. Plus particulièrement, en 2000, où nous avons connu un été très sec qui a particulièrement affecté le maïs-grain. À Deschambault, les précipitations ont été de 40 % inférieures à la normale.

Tableau 4. Rendement des cultures de rotation, Deschambault, 1998, 2000, 2002 et 2004.

Culture	Rendement (t/ha)				% humidité
	1998	2000	2002	2004	
Orge	4,4	6,5	5,0	4,5	14,0
Orgemout	4,3	6,3	4,7	4,2	14,0
Orgegr	3,9	5,7	4,6	4,0	14,0
Soya	3,6	1,3 ^z	2,3	1,3 ³	12,0
Maïs grain	7,4	4,5	7,8	7,2	14,0
Canola	2,6	2,0	1,3	1,6	10,0
Pois	0,9 ¹	3,4	3,5	2,3 ³	12,0
Pdt	15,5	17,1	17,0	28,9	-

Orgegr : orge grainée avec le trèfle rouge; orgemout : orge + moutarde blanche après la récolte d'orge; pdt : pomme de terre.

(1) grains mangés par les pigeons

(2) grains mangés par les chevreuils

(3) problème important de mauvaises herbes

Au niveau des engrais verts (tableau 5), les biomasses en poids sec ont varié de 0,3 à 3,6 t/ha. C'est le trèfle qui a donné les biomasses les plus constantes et les plus élevées. En 2002, les conditions ont été favorables à l'implantation de la moutarde blanche et celle-ci a démontré un bon potentiel. Le regain d'orge après la récolte du grain présente un intérêt certain compte tenu des efforts à déployer pour en bénéficier. En 2004, l'utilisation d'une nouvelle moissonneuse-batteuse, plus performante que l'ancienne, a fait en sorte que peu de grains ont été laissés au sol et qu'aucune repousse n'a été mesurée.

Lorsqu'un engrais vert est incorporé au sol, celui-ci apporte de l'azote qui sera éventuellement disponible pour la prochaine culture. Encore ici, c'est le trèfle qui a été le plus constant à ce chapitre (tableau 5) avec des quantités prélevées d'azote variant de 49,5 à 87,9 kg N/ha. Par contre, c'est la moutarde blanche qui a donné la quantité la plus élevée avec 92 kg N/ha en 2002.

Tableau 5. Rendement en matière sèche des engrais verts en association avec la culture de l'orge, Deschambault, 1998, 2000, 2002 et 2004.

Culture	Rendement, m.s. en t/ha				Teneur en N (%)			N en kg/ha			
	1998	2000	2002	2004	1998	2002	2004	1998	2000 ³	2002	2004
Trèfle rouge	3,6	2,2	3,1	1,4	2,3	2,8	3,7	84,7	50,1	87,9	49,5
Moutarde blanche	0,8 ¹	1,6 ²	3,3 ²	0,9 ²	1,5	2,8	3,9	11,9	23,8	92,0	35,3
Regain d'orge	0,3	1,5	2,1	---	2,6	1,7	---	8,9	40,1	36,1	---

(1) sans fertilisation azotée

(2) avec fertilisation azotée : 75 kg de N

(3) basé sur la teneur en N de 1998

Rendements en pommes de terre

La pomme de terre occupait l'ensemble des parcelles en 1999, 2001, 2003 et 2005. On retrouve au tableau 6 l'analyse de la variance pour ces quatre années pour les rendements totaux et vendables en fonction des différents précédents et de la fertilisation azotée.

Les données montrent que le rendement est très affecté par les précédents (P) et les doses d'azote (N). On note également que l'interaction P x N est toujours significative lorsqu'on considère le rendement total. On peut donc en déduire que les doses d'azote ont eu des effets

différents en fonction des cultures de rotation et que des ajustements à la fertilisation azotée sont nécessaires en fonction des précédents culturaux.

Tableau 6. Analyse de la variance de l'effet de différents précédents culturaux (P) et du niveau de fertilisation azotée (N) sur les rendements en pommes de terre, cv. Shepody, Deschambault, 1999, 2001, 2003 et 2005.

Précédent	Dose N kg/ha	1999 Rendement (t/ha)		2001 Rendement (t/ha)		2003 Rendement (t/ha)		2005 Rendement (t/ha)	
		total	vendable	total	vendable	total	vendable	total	vendable
Canola	0	20,3	19,8	21,4	20,6	18,7	13,5	19,7	17,2
	45	32,3	29,1	30,3	27,1	27,7	20,9	28,4	25,5
	90	35,0	31,1	38,7	32,7	31,4	23,5	34,2	30,0
	135	34,4	31,1	40,6	35,2	34,1	25,4	36,8	32,2
	180	36,9	31,6	41,3	35,2	33,5	23,5	37,5	33,8
Maïs	0	19,1	18,1	21,6	19,9	17,0	12,4	18,6	15,6
	45	29,6	27,2	31,0	27,2	25,6	19,3	27,6	24,6
	90	34,2	31,4	36,4	28,8	29,4	22,2	34,9	31,0
	135	38,8	33,9	39,6	32,6	31,7	23,9	39,4	35,5
	180	41,7	36,0	42,0	35,4	31,9	22,7	38,4	34,7
Orge	0	27,3	26,0	26,4	24,6	20,0	14,4	20,5	18,1
	45	38,3	35,9	33,3	28,7	28,3	21,1	29,6	26,3
	90	42,8	39,3	37,2	29,5	31,6	23,7	37,2	33,1
	135	42,5	38,3	40,8	33,9	31,6	23,8	40,6	36,3
	180	43,9	38,7	42,7	36,3	34,0	25,2	41,3	36,9
Orgegr	0	32,2	29,9	28,9	26,0	23,9	17,6	24,6	21,6
	45	39,1	35,0	34,2	28,6	29,6	20,7	30,5	26,6
	90	44,3	40,3	39,5	32,1	30,3	22,5	33,6	29,3
	135	40,7	35,1	38,6	31,1	32,2	23,7	37,5	33,5
	180	39,9	32,5	39,4	31,4	30,5	22,2	34,8	30,8
Orgemout	0	23,4	22,3	26,8	25,1	23,7	18,3	21,7	19,3
	45	36,2	34,0	34,3	29,1	29,9	23,5	30,3	26,9
	90	40,7	37,3	38,8	32,7	33,4	25,4	37,1	33,5
	135	42,2	35,1	41,6	35,5	34,9	27,2	38,6	33,8
	180	42,5	36,0	42,6	35,1	33,2	25,4	38,1	33,1
Pdt	0	15,2	14,2	16,8	15,5	18,6	12,2	16,0	12,9
	45	20,3	18,7	21,7	16,9	25,3	18,6	23,9	21,0
	90	25,8	22,2	26,7	19,8	29,9	21,4	30,8	27,6
	135	24,4	20,3	24,6	18,1	30,0	21,0	33,7	15,4
	180	24,3	19,4	29,1	22,3	32,4	23,2	31,9	28,1
Pois	0	25,9	23,4	22,4	20,5	17,7	12,8	22,7	19,2
	45	36,5	32,9	32,3	27,3	26,9	20,8	31,0	27,3
	90	39,7	35,3	37,3	30,6	32,0	23,6	35,2	31,9
	135	41,9	36,4	40,3	33,7	32,5	23,0	37,9	33,8
	180	42,3	34,7	41,2	34,0	32,8	24,0	38,9	33,9
Soya	0	23,2	22,4	23,3	21,6	19,3	14,7	22,9	19,9
	45	31,9	29,0	30,8	26,4	27,5	21,0	29,2	25,7
	90	38,8	34,3	37,1	29,1	31,8	23,4	35,1	30,6
	135	38,7	32,0	37,6	31,7	32,9	24,5	36,7	32,3
	180	38,5	32,2	40,8	32,9	31,3	22,6	39,3	34,9
F (p) P		20,6(<0,0001)	17,9(<0,0001)	7,7(0,0001)	10,5(0,0001)	1,3(0,2990)	1,8(0,1356)	2,0(0,1006)	1,3(0,2838)
F (p) N		60,6(<0,0001)	48,9(<0,0001)	67,4(<0,0001)	24,3(<0,0001)	50,8(<0,0001)	22,7(<0,0001)	94,6(<0,0001)	57,1(<0,0001)
F(p) P x N		2,6(0,0004)	2,2(0,0036)	2,7(0,0002)	1,9(0,0135)	2,0(0,0081)	0,9(0,5635)	2,6(0,0005)	1,8(0,0182)
CV %		7,7	9,1	6,2	9,2	6,6	10,1	5,7	7,7
ppds P		3,4	3,4	4,3	3,5	4,4	3,8	5,3	6,7
ppds N		2,3	2,0	2,3	2,6	2,1	2,4	2,1	2,5

Orgegr : orge grainée avec le trèfle rouge; orgemout : orge + moutarde blanche après la récolte d'orge; pdt : pomme de terre.

Étant donné que l'interaction P x N est significative, une analyse de la variance de l'effet de la dose d'azote sur le rendement pour chaque précédent a été faite. Afin de réduire le nombre de données, seuls les chiffres relatifs au rendement total sont présentés. On retrouve les données relatives à l'année 1999 au tableau 7. Pour chacun des précédents, un effet quadratique des doses d'azote sur les rendements en pommes de terre a été démontré.

Tableau 7. Effet du précédent cultural et de la dose d'azote sur le rendement total de pommes de terre, cv. Shepody, Deschambault, 1999.

Dose de N kg/ha	Rendement total (t/ha) Précédent							
	Canola	Maïs	Orge	Orgegr	Orgemout	Pois	Soya	Pdt
0	20,3	19,1	27,3	32,2	23,4	25,9	23,2	15,2
45	32,3	29,6	38,3	39,1	36,2	36,5	31,9	20,3
90	35,0	34,3	42,8	44,3	40,7	39,7	38,8	25,8
135	34,4	38,8	42,5	40,7	42,2	41,9	38,7	24,4
180	36,8	41,7	43,9	39,9	42,5	42,3	38,5	24,3
	F(p)							
Contrastes								
Linéaire	125,4(<0,0001)	99,8(<0,0001)	109,8(<0,0001)	11,4(0,0056)	57,4(<0,0001)	81,8(<0,0001)	41,3(<0,0001)	38,6(<0,0001)
Quadratique	35,9(<0,0001)	5,6(0,0363)	32,7(<0,0001)	16,7(0,0015)	16,4(0,0016)	18,2(0,0011)	12,9(0,0037)	16,7(0,0015)

Orgegr : orge grainée avec le trèfle rouge; orgemout : orge + moutarde blanche après la récolte d'orge; pdt : pomme de terre.

À partir de ces informations, les fonctions de production ont été déterminées pour chacun des systèmes de rotation, ce qui permet de calculer les doses d'azote nécessaires pour atteindre le rendement maximal et optimal. Ces données sont présentées au tableau 8.

C'est en situation de monoculture de pommes de terre, que nous avons mesuré le rendement le plus faible. En absence de rotation, il se situe à 25,4 t/ha, tandis qu'il peut dépasser les 40 t/ha lorsqu'il y a rotation. Notons également qu'en monoculture, la dose de N optimale et maximale se compare à plusieurs autres précédents mais pour un rendement moindre. Toujours au tableau 8, on note que le rendement relatif est de 75,2 % dans le cas de l'orge grainée comme précédent et de 47,0 % pour le maïs, le niveau le plus bas de toutes les cultures de rotation. Aussi, les doses optimales de N vont de 109 kg/ha pour l'orge grainée à 197 kg/ha pour le maïs. Dans ce cas, nous dépassons la dose maximale testée qui était de 180 kg/ha de N. On retrouve une explication à ce phénomène aux tableaux 7 et 8. En ce qui concerne le précédent maïs, on note que la quadratique donne une équation avec un terme du second degré relativement peu élevé, ce qui indique une faible courbure de la parabole. Cette situation nous amène à des doses de N, au-delà de la dose maximale utilisée au cours de ces travaux. On note aussi que la faible différence entre la dose optimale et maximale de N, qui est en moyenne de 4 kg, n'amène pas de différence entre le rendement total maximal et optimal calculé. Ces 4 kg de N en moins amènent une baisse du rendement de l'ordre d'une douzaine de kg de pommes de terre. Les rendements étant exprimés en t/ha, cette faible différence n'apparaît pas.

Un graphique illustrant la relation entre le rendement total en pommes de terre et les doses d'azote selon les différents précédents culturaux est également présenté (figure 1).

Tableau 8. Fonctions de production de pommes de terre pour le rendement total en t/ha selon différents précédents culturaux et cinq niveaux d'azote, cv. Shepody, Deschambault 1999.

Précédent	Fonction de production	Pr > F	R ²	RR* %	Dose de N		Rendement total	
					opt**	max	opt	max
					kg/ha		t/ha	
Canola	$y = 21,5 + 0,2195x - 0,000785x^2$	<0,0001	0,73	58,4	136	140	36,8	36,8
Maïs	$y = 19,6 + 0,2177x - 0,000537x^2$	<0,0001	0,76	47,0	197	203	41,7	41,7
Orge	$y = 28,1 + 0,2357x - 0,000849x^2$	<0,0001	0,82	63,3	135	139	44,4	44,4
Ogregr	$y = 32,4 + 0,1914x - 0,000855x^2$	0,003	0,50	75,2	109	112	43,1	43,1
Orgemout	$y = 24,1 + 0,2763x - 0,000989x^2$	<0,0001	0,82	55,5	137	140	43,4	43,4
Pois	$y = 26,5 + 0,2207x - 0,000753x^2$	0,0003	0,61	62,0	143	147	42,7	42,7
Soya	$y = 23,2 + 0,2400x - 0,000870x^2$	<0,0001	0,68	58,4	134	137	39,7	39,7
Pdt	$y = 15,1 + 0,1585x - 0,000607x^2$	0,0165	0,38	59,5	125	130	25,4	25,4

Orgegr : orge grainée avec le trèfle rouge; orgemout : orge + moutarde blanche après la récolte d'orge; pdt : pomme de terre.

*RR, Rendement relatif : (rendement sans N / rendement maximal avec N) x 100

**Calculé pour une productivité limite de 6 kg de pommes de terre pour rentabiliser 1 kg de N

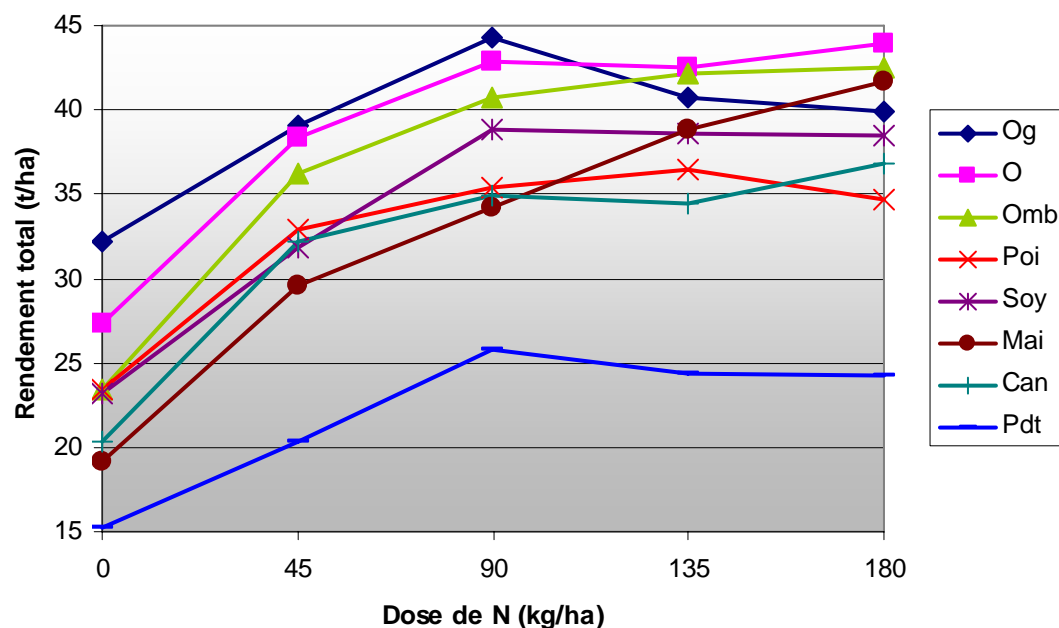


Figure 1. Rendement total en t/ha de pommes de terre selon la dose d'azote pour différents précédents culturaux, cv. Shepody, Deschambault, 1999.

Après l'année 1999, les pommes de terre ont occupé l'ensemble des parcelles en 2001, 2003 et 2005. Comme il est noté au tableau 6, une interaction significative P x N a également été mesurée pour ces années. C'est donc dire que, comme en 1999, les doses d'azote ont eu des effets différents en fonction des cultures de rotation. Retenons que la plupart des éléments discutés pour l'année 1999 s'appliquent pour les autres années à quelques nuances près. Nous reprenons ici les éléments importants pour l'année 2001.

Les rendements obtenus en pommes de terre en 2001 ont été semblables à ceux de 1999. Les effets quadratiques des doses d'azote sur les rendements sont démontrés au tableau 9. Pour trois précédents, la monoculture de pommes de terre, le maïs et l'orge en semis pur, les paraboles présentent une faible courbure, ce qui donne des doses d'azote optimales et

maximales qui vont au-delà de la dose maximale testée (tableaux 9 et 10). C'est en 2001 que ce phénomène a été le plus important. Pour cette année-là, le fait que nous ayons connu 23 jours sans pluie entre le 15 juillet et le 15 août, pourrait expliquer cette situation.

En 2001, comme en 1999, c'est lorsque le trèfle est intégré à la rotation que nous mesurons les doses de N optimales et maximales les plus basses et le rendement relatif en pommes de terre le plus élevé, soit 72,6 % (tableau 10). Un graphique illustrant la relation entre le rendement en pommes de terre et les doses d'azote selon les différents précédents culturaux est également présenté (figure 2).

Tableau 9. Effet du précédent cultural et de la dose d'azote sur le rendement total de pommes de terre, cv. Shepody, Deschambault, 2001.

Dose de N kg/ha	Rendement total (t/ha) Précédent							
	Canola	Maïs	Orge	Orgegr	Orgemout	Pois	Soya	Pdt
0	21,4	21,6	26,4	28,9	26,9	22,5	23,3	16,8
45	30,3	31,0	33,3	34,2	34,3	32,3	30,8	21,7
90	38,7	36,4	37,2	39,5	38,8	37,4	37,1	26,7
135	40,7	39,6	40,9	38,6	41,6	40,3	37,7	24,6
180	41,3	42,0	42,7	39,4	42,6	41,2	40,8	29,1
	F(p)							
Contrastes								
Linéaire	107,6(<0,0001)	118,4(<0,0001)	152,2(<0,0001)	40,5(<0,0001)	102,7(<0,0001)	99,2(<0,0001)	148,2(<0,0001)	64,0(<0,0001)
Quadratique	16,2(0,0017)	9,2(0,0103)	7,1(0,0205)	10,3(0,0075)	10,0(0,0081)	13,6(0,0031)	12,6(0,0040)	4,0(0,0697)

Orgegr : orge grainée avec le trèfle rouge; orgemout : orge + moutarde blanche après la récolte d'orge; pdt : pomme de terre.

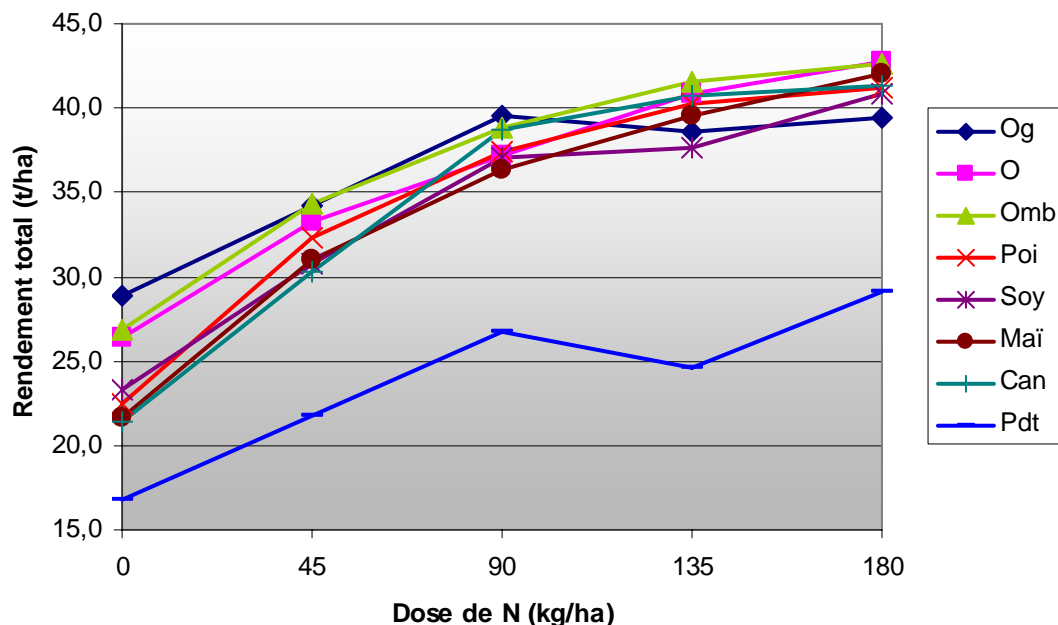


Figure 2. Rendement total en t/ha de pommes de terre selon la dose d'azote pour différents précédents culturaux, cv. Shepody, Deschambault, 2001.

Tableau 10. Fonctions de production de pommes de terre pour le rendement total selon différents précédents culturaux et cinq niveaux d'azote, cv. Shepody, Deschambault 2001.

Précédent	Fonction de production	Pr > F	R ²	RR %	Dose de N		Rendement total	
					opt	max	opt	max
					kg/ha		t/ha	
Canola	$y = 21,1 + 0,2578x - 0,000813x^2$	<0,0001	0,84	50,7	155	159	41,6	41,6
Maïs	$y = 21,9 + 0,2136x - 0,000576x^2$	<0,0001	0,72	52,5	180	185	41,7	41,7
Orge	$y = 26,6 + 0,1542x - 0,000362x^2$	<0,0001	0,83	62,6	205	213	42,5	42,5
Ogregr	$y = 28,9 + 0,1522x - 0,000533x^2$	0,0021	0,52	72,6	137	143	39,8	39,8
Orgemout	$y = 27,0 + 0,1776x - 0,000507x^2$	<0,0001	0,80	63,5	169	175	42,5	42,5
Pois	$y = 22,8 + 0,2279x - 0,000704x^2$	<0,0001	0,77	53,3	158	162	41,2	41,2
Soya	$y = 23,5 + 0,1849x - 0,000510x^2$	<0,0001	0,78	58,3	175	181	40,2	40,2
Pdt	$y = 17,1 + 0,1122x - 0,000285x^2$	0,0697	0,43	60,6	186	197	28,2	28,2

Orgegr : orge grainée avec le trèfle rouge; orgemout : orge + moutarde blanche après la récolte d'orge; pdt : pomme de terre.

Pour l'année 2003, les rendements en pommes de terre ont été relativement faibles (tableau 11) et l'effet du précédent cultural n'est pas significatif. Notons tout de même que l'interaction P x N demeure significative (tableau 6). C'est donc dire que comme en 1999 et 2001, les doses d'azote ont eu des effets différents en fonction des cultures de rotation. Aussi, en 2003, les effets quadratiques des doses d'azote sur les rendements sont dans l'ensemble très significatifs.

Certains autres éléments méritent d'être signalés. Comme pour les autres années, c'est toujours lorsque le trèfle est présent dans la rotation, que nous mesurons les doses optimales de N les plus basses et les rendements relatifs les plus élevés, soit 75,9 % (tableau 12). C'est également en 2003 que le précédent incorporant la moutarde blanche se compare au trèfle pour les doses de N et le rendement relatif. Cette situation met en relief le fait que c'est en 2002 que la moutarde blanche a donné le meilleur rendement (tableau 5) et qu'en 2003 l'impact sur la fertilisation azotée de la pomme de terre a été le plus important. Un graphique illustrant la relation entre le rendement total en pommes de terre et les doses d'azote selon les différents précédents culturaux est aussi présenté (figure 3).

Tableau 11. Effet du précédent cultural et de la dose d'azote sur le rendement total de pommes de terre, cv. Shepody, Deschambault, 2003.

Dose de N kg/ha	Rendement total (t/ha) Précédent							
	Canola	Maïs	Orge	Orgegr	Orgemout	Pois	Soya	Pdt
0	18,7	17,0	20,0	23,9	23,7	17,7	19,3	18,7
45	27,7	25,6	28,3	29,6	29,9	26,9	27,5	25,3
90	31,4	29,4	31,6	30,3	33,4	32,0	31,8	29,9
135	34,1	31,7	31,7	32,2	34,9	32,5	32,9	30,0
180	33,5	31,9	34,0	30,5	33,3	32,8	31,3	32,4
	F(p)							
Contrastes								
Linéaire	234,2(<0,0001)	72,8(<0,0001)	72,3(<0,0001)	21,5(0,0006)	27,4(0,0002)	68,0(<0,0001)	160,8(<0,0001)	77,4(<0,0001)
Quadratique	52,1(<0,0001)	13,6(0,0031)	12,3(0,0043)	11,4(0,0055)	10,4(0,0072)	19,3(0,0009)	67,8(<0,0001)	8,9(0,0116)

Orgegr : orge grainée avec le trèfle rouge; orgemout : orge + moutarde blanche après la récolte d'orge; pdt : pomme de terre.

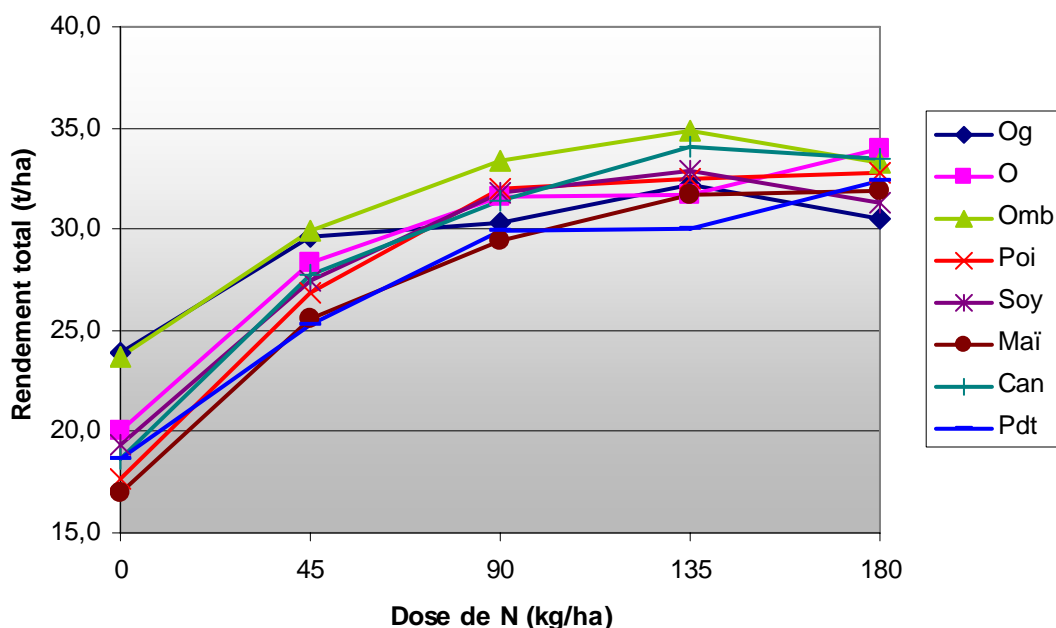


Figure 3. Rendement total en t/ha de pommes de terre selon la dose d'azote pour différents précédents culturaux, cv. Shepody, Deschambault, 2003.

Tableau 12. Fonctions de production de pommes de terre pour le rendement total selon différents précédents culturaux et cinq niveaux d'azote, cv. Shepody, Deschambault 2003.

Précédent	Fonction de production	Pr > F	R ²	RR %	Dose de N		Rendement total	
					opt	max	opt	max
					kg/ha		t/ha	
Canola	$y = 19,0 + 0,2078x - 0,00071x^2$	<0,0001	0,95	55,6	142	146	34,2	34,2
Maïs	$y = 17,3 + 0,1963x - 0,000648x^2$	<0,0001	0,81	53,7	147	151	32,2	32,2
Orge	$y = 20,7 + 0,1666x - 0,000539x^2$	<0,0001	0,78	61,8	149	155	33,5	33,5
Ogregr	$y = 24,2 + 0,1213x - 0,000479x^2$	0,0126	0,40	75,9	120	126	31,9	31,9
Orgemout	$y = 23,6 + 0,1661x - 0,000624x^2$	<0,0001	0,67	68,0	128	133	34,7	34,7
Pois	$y = 18,0 + 0,2220x - 0,000793x$	<0,0001	0,84	53,6	136	140	33,6	33,6
Soya	$y = 19,4 + 0,2098x - 0,000801x^2$	<0,0001	0,88	58,6	127	131	33,1	33,1
Pdt	$y = 19,0 + 0,1537x - 0,000455x^2$	<0,0001	0,67	59,6	162	169	31,9	31,9

Orgregr : orge grainée avec le trèfle rouge; orgemout : orge + moutarde blanche après la récolte d'orge; pdt : pomme de terre.

Les rendements mesurés en 2005 se situent entre ceux de 2001 et de 2003 (tableau 15). En 2005, les effets quadratiques des doses d'azote sur les rendements sont dans l'ensemble très significatifs (tableau 13). C'est toujours lorsque le trèfle est intégré à la rotation que nous mesurons les doses de N les plus faibles pour atteindre les rendements optimaux (tableau 14). Dans le cas du soya, la dose maximale de N est supérieure à la dose maximale utilisée dans le cadre de cette recherche. Une représentation graphique de la relation entre le rendement total en pommes de terre et les doses d'azote selon les différents précédents culturaux est également présentée à la figure 4.

Tableau 13. Effet du précédent cultural et de la dose d'azote sur le rendement total de pommes de terre, cv. Shepody, Deschambault, 2005.

Dose de N kg/ha	Rendement total (t/ha) Précédent							
	Canola	Maïs	Orge	Orgegr	Orgemout	Pois	Soya	Pdt
0	19,7	18,6	20,5	24,6	21,7	22,7	22,9	16,0
45	28,4	27,6	29,6	30,5	30,3	31,0	29,2	23,9
90	34,2	34,9	37,2	33,6	37,1	35,2	35,1	30,8
135	36,8	39,4	40,6	37,5	38,6	37,9	36,8	33,7
180	37,5	38,4	41,3	34,8	38,1	38,9	39,3	31,9
	F(p)							
Contrastes								
Linéaire	123,2(<0,0001)	239,0(<0,0001)	197,8(<0,0001)	114,6(<0,0001)	78,1(<0,0001)	127,0(<0,0001)	138,3(<0,0001)	191,4(<0,0001)
Quadratique	17,1(0,0014)	33,4(<0,0001)	22,4(0,0005)	29,1(0,0002)	18,2(0,0011)	15,2(0,0021)	8,2(0,0144)	43,1(<0,0001)

Orgegr : orge grainée avec le trèfle rouge; orgemout : orge + moutarde blanche après la récolte d'orge; pdt : pomme de terre.

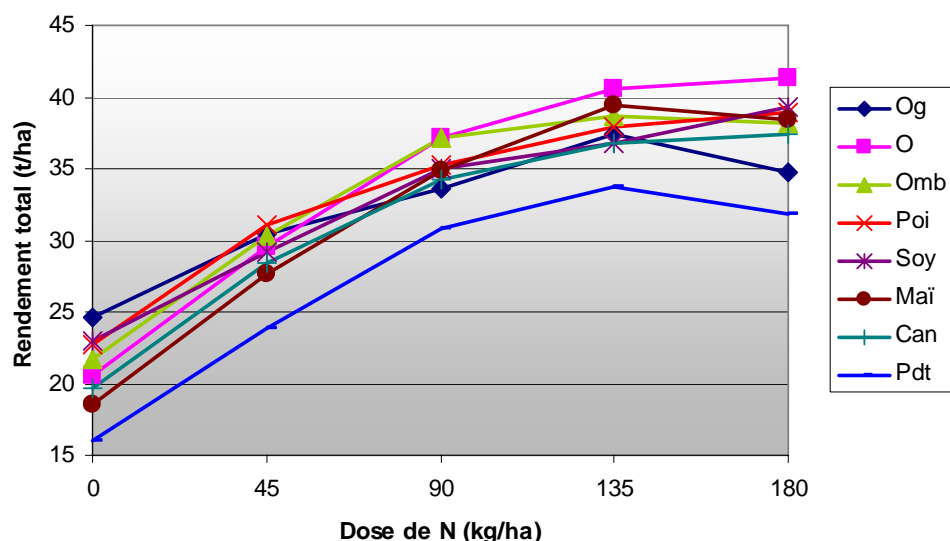


Figure 4. Rendement total en t/ha de pommes de terre selon la dose d'azote pour différents précédents culturaux, cv. Shepody, Deschambault, 2005.

Tableau 14. Fonctions de production de pommes de terre pour le rendement total selon différents précédents culturaux et cinq niveaux d'azote, cv. Shepody, Deschambault 2005.

Précédent	Fonction de production	Pr > F	R ²	RR %	Dose de N		Rendement total	
					opt	max	opt	max
					kg/ha		t/ha	
Canola	$y = 19,8 + 0,2206x - 0,00068x^2$	<0,0001	0,92	55,5	157	161		
Maïs	$y = 18,2 + 0,2591x - 0,000804x^2$	<0,0001	0,96	46,6	158	161	39,1	39,1
Orge	$y = 20,3 + 0,2498x - 0,000739x^2$	<0,0001	0,95	49,0	165	169	41,5	41,4
Orgegr	$y = 24,4 + 0,1641x - 0,000574x^2$	<0,0001	0,94	67,6	137	143	36,1	36,1
Orgemout	$y = 21,6 + 0,2413x - 0,000832x^2$	<0,0001	0,90	55,2	142	145	39,1	39,1
Pois	$y = 23,0 + 0,190x - 0,000570x^2$	<0,0001	0,96	59,3	161	167	38,8	38,8
Soya	$y = 22,9 + 0,1633x - 0,000409x^2$	<0,0001	0,93	58,4	192	200	39,2	39,2
Pdt	$y = 19,0 + 0,1537x - 0,000455x^2$	<0,0001	0,96	47,0	143	146	33,2	33,2

Orgegr : orge grainée avec le trèfle rouge; orgemout : orge + moutarde blanche après la récolte d'orge; pdt : pomme de terre.

Pour terminer le chapitre sur les rendements, nous présentons les moyennes des rendements de chaque précédent, pour toutes les années et tous les niveaux de N confondus (tableau 15) et les moyennes des rendements par niveau de N pour toutes les années et tous les précédents confondus (tableau 16). Les rendements les plus faibles ont été obtenus en monoculture de pommes de terre. Le rendement total moyen s'élève à 25,1 t/ha. À titre comparatif, ce rendement atteint plus de 34 t/ha lorsqu'une culture d'orge est introduite dans la rotation.

Au niveau de la fertilisation azotée, tous précédents confondus, on note un impact majeur des premiers kg d'azote sur l'augmentation des rendements avec un plafonnement qui survient assez rapidement et qui est particulièrement remarquable au-delà de 90 kg/ha de N. À 150 kg/ha on aurait atteint le rendement maximal. Le rendement vendable semble plafonner plus rapidement que le rendement total. Les données du tableau 17 pourraient expliquer cette situation. Nous avons constaté que la quantité de pommes de terre déclassées en raison de difformités et de fissures de croissance était plus élevée avec l'augmentation des doses d'azote. Ce phénomène a entraîné une stagnation du rendement vendable malgré l'augmentation du rendement total et des doses de N.

On retrouve à la figure 5 une représentation graphique de la relation entre le rendement total en pommes de terre et les doses d'azote selon les différents précédents culturaux pour la moyenne des années 1999, 2001, 2003 et 2005.

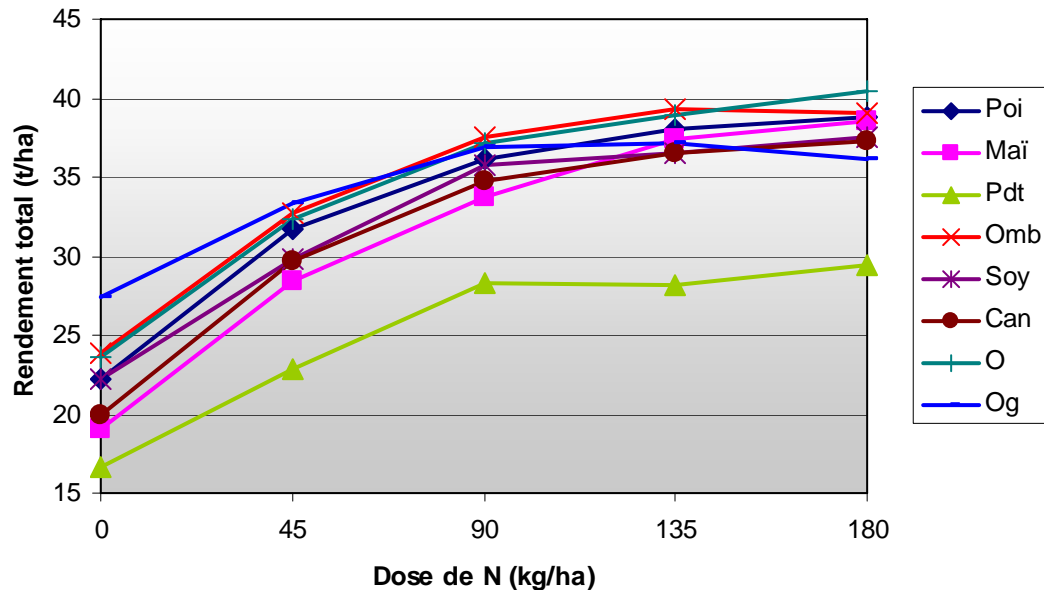


Figure 5. Rendement total en t/ha de pommes de terre selon la dose d'azote pour différents précédents culturaux, cv. Shepody, Deschambault, 1999, 2001, 2003 et 2005.

Tableau 15. Rendement en pommes de terre selon les différentes cultures de rotation, toutes les doses d'azote confondues, cv. Shepody, Deschambault 1999, 2001, 2003 et 2005.

Précédent	Rendement total (t/ha)					Rendement vendable (t/ha)				
	1999	2001	2003	2005	Moyenne	1999	2001	2003	2005	Moyenne
Canola	31,8	34,5	29,1	31,3	31,7	28,5	30,2	21,4	27,7	27,0
Maïs	32,7	34,1	27,1	31,8	31,4	29,3	28,8	20,1	28,3	26,6
Orge	39,0	36,1	29,1	33,8	34,5	35,6	30,6	21,6	30,1	29,5
Ogregr	39,2	36,1	29,3	32,2	34,2	34,6	29,9	21,3	28,4	28,6
Orgemout	37,0	36,8	31,0	33,2	34,5	32,9	31,5	24,0	29,3	29,4
Pois	37,2	34,7	28,4	33,1	33,4	32,6	29,2	20,8	29,2	28,0
Soya	34,2	34,0	28,5	32,7	32,3	30,0	28,4	21,2	28,7	27,1
Pdt	22,0	23,8	27,3	27,2	25,1	19,0	18,5	18,5	23,9	20,0
Moyenne	34,1	33,8	28,7	31,9	32,1	30,3	28,4	21,2	28,2	27,0

Orgegr : orge grainée avec le trèfle rouge; orgemout : orge + moutarde blanche après la récolte d'orge; pdt : pomme de terre.

Tableau 16. Rendement en pommes de terre selon les différents niveaux de N, tous les systèmes de rotation confondus, cv. Shepody, Deschambault 1999, 2001, 2003 et 2005.

Dose de N kg/ha	Rendement total (t/ha)					Rendement vendable (t/ha)				
	1999	2001	2003	2005	Moyenne	1999	2001	2003	2005	Moyenne
0	23,3	23,5	19,9	20,8	21,9	22,0	21,7	14,5	18,0	19,1
45	33,0	31,0	27,6	28,1	30,1	30,2	26,4	20,8	25,5	25,7
90	37,7	36,5	31,2	34,8	35,0	33,9	29,4	23,2	30,9	29,4
135	37,9	38,0	32,5	37,7	36,5	32,8	31,5	24,1	33,4	30,5
180	38,7	39,9	32,5	37,5	37,1	32,6	32,8	23,6	33,3	30,6

Tableau 17. Quantité de pommes de terre rejetées pour difformités et fissures lors du classement selon les différents niveaux de N, cv. Shepody, Deschambault 1999, 2001, 2003 et 2005.

Dose de N kg/ha	Rejets t/ha				
	1999	2001	2003	2005	Moyenne
0	1,3	1,7	1,4	0,6	1,3
45	2,8	4,6	2,8	1,0	2,8
90	3,8	7,1	4,0	1,3	4,0
135	5,2	6,5	4,0	1,4	4,0
180	6,1	7,1	4,7	2,4	5,1

L'ensemble des données que nous venons de présenter nous indiquent que la fertilisation azotée de la pomme de terre peut être fortement influencée par les précédents culturaux. Pour un même rendement, lorsque le précédent culturel incorpore une légumineuse comme le trèfle, il peut arriver que le besoin en N de la pomme de terre soit presque deux fois moins élevé que le précédent qui en exige le plus. Il nous apparaît donc nécessaire d'apporter des ajustements à la fertilisation avant la plantation et pour ce faire, nous avons besoin d'indicateurs de la fertilité azotée des sols. Aussi, en cours de culture, des indicateurs reliés au statut de la plante seraient utiles pour faire les ajustements qui pourraient s'imposer.

Dans le cadre de nos travaux, afin de permettre l'élaboration de tels indicateurs, nous avons déterminé les niveaux de nitrates dans les sols au moment de la plantation et au buttage dans les parcelles témoins (0 N). De plus, nous avons exprimé les rendements sur une base relative, ce qui permet entre autres de relier la capacité du sol à fournir de l'azote avec la réponse des plantes. Cette façon d'exprimer le rendement fournit une base de comparaison qui permet de faire un lien entre les années et les différents indicateurs. Nous avons cherché à

connaître le prélèvement en N de la production et l'avons exprimé sur une base relative. Les coefficients d'utilisation des engrais azotés ont également été mesurés. L'ensemble de ces éléments nous permettent de proposer des grilles de fertilisation azotée qui tiennent compte de la capacité des sols à fournir de l'azote aux plantes et du coefficient d'utilisation des engrais appliqués.

En cours de culture, nous avons aussi mesuré le contenu en nitrates des pétioles et déterminé un indice de chlorophylle des feuilles à quatre stades de développement de la plante : au début de la floraison, à la pleine floraison et à un intervalle de sept jours par la suite.

Teneur et prélèvement en azote des tubercules de pommes de terre

Lorsqu'on connaît la quantité de N prélevée par la pomme de terre, il devient possible de réaliser un bilan prévisionnel afin de préciser la provenance de cet azote. Cet aspect de la gestion de l'azote dans la pomme de terre sera abordé plus loin. À ce stade, on retrouve la teneur et le prélèvement en azote des tubercules de pommes de terre de même que l'analyse de la variance pour les années 1999, 2001 et 2003 (tableau 18). En 2005, la teneur en azote des tubercules n'a pas été mesurée. Pour les trois années, les prélèvements en N total des tubercules ont été très affectés par les précédents culturaux ($p = 0,008$ à $p < 0,0001$) et par les doses d'azote ($p < 0,0001$). L'interaction précédent x dose est quant à elle significative seulement en 1999. Les prélèvements en N des parcelles témoins sans N de chacune des rotations révèlent bien l'aptitude des sols à fournir de l'azote à la pomme de terre. À titre d'exemple, en 1999, ces valeurs vont de 91,9 kg/ha pour le précédent avec trèfle rouge à 49,5 kg/ha dans le cas d'une rotation avec le maïs et à 39,3 kg/ha pour la monoculture de pommes de terre (tableau 18). C'est toujours lorsque le trèfle est présent dans la rotation, que nous mesurons les prélèvements les plus importants dans les parcelles témoins sans N.

Nous retrouvons au tableau 19 les prélèvements en N en fonction du précédent cultural (toutes doses de N confondues) et au tableau 20 les prélèvements en N en fonction de la dose de N (tous précédents confondus) pour les années 1999, 2001 et 2003. Encore ici, c'est lorsque le trèfle est présent dans la rotation que nous mesurons le prélèvement en N le plus important. On note au tableau 20 que les prélèvements augmentent avec la dose de N et nous mesurons un effet quadratique très significatif lorsque nous confondons l'ensemble des précédents pour les années 2001 et 2003, années où il n'y avait pas d'interaction significative.

Ces résultats démontrent que la fourniture en N du sol varie selon les cultures utilisées dans la rotation et que les derniers kg de N apportés n'ont pas le même effet que les premiers et qu'ils ne sont pas nécessairement rentables. Encore là, on démontre que des ajustements importants doivent être apportés à la fertilisation azotée de la pomme de terre dans un contexte où l'on veut rationaliser les coûts et réduire l'impact sur l'environnement.

Tableau 18. Analyse de la variance de l'effet de différents précédents culturaux et du niveau de fertilisation azotée sur le rendement en matière sèche, la teneur en N et le prélèvement en azote des tubercules de pommes de terre, cv. Shepody, Deschambault, 1999, 2001 et 2003.

Précédent	Dose N kg/ha	1999			2001			2003		
		Rend. kg MS/ha	Teneur N % N	Prélèv. kg N/ha	Rend. kg MS/ha	Teneur N % N	Prélèv. kg N/ha	Rend. kg MS/ha	Teneur N % N	Prélèv. kg N/ha
Canola	0	4828,8	1,0635	51,5	5147,7	1,099	56,4	4200,3	1,199	50,4
	45	7175,5	1,4246	100,0	7209,6	1,127	81,3	6271,5	1,250	78,1
	90	8106,0	1,2365	99,9	9021,1	1,299	115,6	6758,3	1,454	98,0
	135	7723,9	1,4569	113,3	9428,3	1,405	132,0	7812,6	1,494	116,1
	180	8222,0	1,7186	140,5	9852,6	1,425	140,2	7453,4	1,708	127,4
Maïs	0	4526,9	1,1040	49,5	4953,7	1,051	53,3	3867,7	1,177	45,4
	45	7032,0	1,0922	76,8	7195,1	1,213	87,1	5775,0	1,149	66,0
	90	8400,6	1,0992	91,6	8519,2	1,212	103,6	6525,8	1,440	94,0
	135	8946,8	1,3896	123,4	8681,7	1,541	133,4	6749,4	1,562	105,7
	180	9877,2	1,4959	148,0	9605,3	1,516	146,2	7223,9	1,713	123,2
Orge	0	6846,3	0,9241	63,1	6328,0	1,020	64,7	4628,4	1,134	52,5
	45	9554,5	1,0649	101,3	7958,3	1,138	89,8	6541,5	1,287	84,2
	90	10572,2	1,0624	112,0	8861,6	1,174	103,8	7074,5	1,373	96,9
	135	10224,9	1,3882	141,1	9521,5	1,356	128,5	7212,2	1,540	110,9
	180	10320,4	1,6644	169,3	9368,9	1,449	135,4	7765,8	1,514	117,4
Orgegr	0	7946,0	1,1533	91,9	6809,1	1,137	78,1	5380,6	1,398	75,4
	45	9067,9	1,3196	119,1	7863,2	1,334	104,8	6691,6	1,527	102,4
	90	10347,6	1,3882	144,2	9475,5	1,428	134,3	6761,0	1,628	109,3
	135	9376,6	1,6644	155,6	8741,7	1,601	139,8	7192,2	1,751	125,9
	180	8926,8	1,9481	172,2	8427,0	1,842	154,8	6717,8	1,804	121,0
Orgemout	0	5605,8	1,0338	57,6	6500,2	1,009	65,6	5214,1	1,254	65,8
	45	8795,2	1,2160	107,4	7822,1	1,131	89,0	6757,5	1,253	85,2
	90	9932,7	1,3201	130,7	8958,6	1,272	113,2	7135,6	1,515	107,0
	135	10539,6	1,1850	125,2	9521,9	1,379	131,5	7728,9	1,546	119,4
	180	10091,5	1,5431	155,3	9806,7	1,567	153,7	7263,1	1,663	120,5
Pdt	0	3435,9	1,1350	39,3	3616,6	1,293	45,2	3975,7	1,283	51,0
	45	4411,5	1,4681	64,9	4699,4	1,409	66,7	5562,2	1,305	72,2
	90	5740,0	1,4449	82,3	5978,6	1,486	88,4	6385,8	1,488	94,7
	135	5172,9	1,7500	90,5	5288,6	1,644	86,4	6363,0	1,777	112,9
	180	4902,9	1,9756	95,9	6158,8	1,766	109,2	6927,8	1,708	118,3
Pois	0	5973,8	1,0598	64,9	5184,5	1,062	56,2	3858,1	1,155	44,6
	45	8673,4	1,2766	109,1	7252,4	1,132	80,9	6007,0	1,336	80,0
	90	9568,3	1,3075	125,3	8647,0	1,296	111,9	7224,2	1,446	103,4
	135	9634,2	1,3038	125,6	8975,8	1,573	140,4	7093,9	1,417	100,8
	180	9680,5	1,5727	150,4	9108,8	1,460	132,3	7470,8	1,656	122,6
Soya	0	5616,0	1,0488	58,7	5615,4	1,085	60,9	4360,3	1,235	53,5
	45	7294,7	1,4086	102,3	7450,2	1,121	83,3	6309,5	1,270	79,9
	90	9137,5	1,2487	113,8	8317,9	1,439	118,6	7166,1	1,495	106,8
	135	9747,3	1,3483	130,4	8580,2	1,601	136,3	7228,6	1,686	121,7
	180	8774,9	1,5882	137,4	9287,8	1,589	147,4	6847,8	1,791	122,6
F (p) P		27,3(<0,0001)	7,43(0,0002)	10,25(<0,0001)	11,40(<0,0001)	4,48(0,0035)	4,59(<0,0030)	1,75(0,1503)	5,56(0,0010)	3,82(0,0079)
F (p) N		39,8(<0,0001)	23,11(<0,0001)	66,96(<0,0001)	55,50(<0,0001)	84,03(<0,0001)	139,92(<0,0001)	48,19(<0,0001)	63,85(<0,0001)	91,30(<0,0001)
F (p) P x N		2,4(0,0011)	1,18(0,2775)	1,73(0,0285)	2,08(0,0056)	0,66(0,8927)	1,26(0,2093)	2,34(0,0016)	0,82(0,7122)	1,48(0,0880)
CV %		9,9	13,5	12,0	8,2	11,9	11,6	7,1	9,5	10,2
ppds P		786	0,129	15,74	891,5	0,150	17,3	923,5	0,1023	10,4
ppds N		651	0,139	11,22	535,5	0,062	7,7	472,3	0,0692	8,0

Orgegr : orge grainée avec le trèfle rouge; orgemout : orge + moutarde blanche après la récolte d'orge; pdt : pomme de terre.

Tableau 19. Effet du précédent cultural sur le prélèvement en azote des tubercules de pommes de terre, toutes les doses d'azote confondues, cv. Shepody, Deschambault, 1999, 2001 et 2003.

Précédent	Prélèvement en N (kg/ha)			
	1999	2001	2003	Moyenne
Canola	101,0	105,1	94,0	100,0
Maïs	97,8	104,7	86,8	96,4
Orge	117,4	104,4	92,4	104,7
Ogregr	136,6	122,4	106,8	121,9
Orgemout	115,2	110,6	99,6	108,5
Pois	115,1	104,4	90,3	103,3
Soya	108,5	109,3	96,9	104,9
Pdt	74,6	79,2	89,8	81,2
F(p)	---	4,6 (0,0030)	3,8 (0,0079)	---
ppds	---	17,3	10,4	---

Orgegr : orge grainée avec le trèfle rouge; orgemout : orge + moutarde blanche après la récolte d'orge; pdt : pomme de terre.

Tableau 20. Effet de la dose d'azote sur le prélèvement en azote des tubercules de pommes de terre, cv. Shepody, tous les systèmes de rotation confondus, Deschambault, 1999, 2001 et 2003.

Dose de N kg/ha	Prélèvement en N (kg/ha)			
	1999	2001	2003	Moyenne
0	59,6	60,1	54,8	58,2
45	97,6	85,4	81,0	88,0
90	112,5	111,2	101,3	108,3
135	125,6	128,5	114,2	122,8
180	146,1	139,9	121,6	135,9
F (p)				
Contrastes				
Linéaire	---	542,4 (<0,0001)	347,3 (<0,0001)	---
Quadratique	---	12,5 (0,0041)	17,9 (0,0012)	---

À partir de ces données, il devient possible de préciser un prélèvement en N exprimé en kg/t de tubercules. Comme nous l'avons déjà mentionné, cette donnée est nécessaire si l'on veut réaliser un bilan prévisionnel à partir des données des prélèvements. Lorsqu'on analyse l'ensemble des données des rendements en pommes de terre pour les années 1999 à 2005, on constate que le niveau optimal de N se situe aux alentours de 150 kg/ha pour un rendement total de 37 t/ha (tableau 16). À ce niveau de fertilisation, les données du tableau 20 permettent d'estimer que le prélèvement en N des tubercules est de l'ordre de 130 kg/ha. Pour un rendement de 37 t/ha, on obtient un prélèvement de 3,5 kg N/t de tubercules. À cela, il faut ajouter la valeur des fanes. Les travaux de Tran et Giroux (1991) ont démontré qu'à 95 jours après la plantation, pour une fertilisation en N de l'ordre de 140 kg/ha, le prélèvement en N des tubercules compte pour 80 % du prélèvement total. À partir de là, nous avons estimé qu'à la récolte, la quantité de N prélevée et restant dans le feuillage est de l'ordre de 1 kg de N à chaque fois qu'on prélève 3,5 kg N/t de tubercules. En incluant les fanes, on arrive donc à un prélèvement total de 4,5 kg N/t de tubercules.

Teneurs en azote des pétioles et indices de chlorophylle des feuilles de pommes de terre à la pleine floraison

Plusieurs travaux (Hochnuth 1994, Painchaud 1997, Tremblay et Belec 2006, Vitosh et Silva 1996 et Waterer 1996) sur la teneur en azote des pétioles et sur un indice de chlorophylle (IC) des feuilles en relation avec le rendement ont permis de démontrer que la détermination de ces valeurs peut permettre de vérifier si les besoins en N de la pomme de terre ont été adéquatement comblés. On retrouve au tableau 21 les données relatives à la teneur en nitrates des pétioles de feuilles de pommes de terre à la pleine floraison pour les années 1999, 2001 et 2003. Ces teneurs sont très affectées par les systèmes de rotation ($p = 0,027$ à $p < 0,0001$) et par les doses d'azote ($p < 0,0001$). L'interaction précédent x dose apparaît très significative ($p = 0,020$) en 1999 seulement.

Les teneurs moyennes en nitrates des pétioles, toutes doses d'azote confondues, ont été plus élevées lorsque le trèfle est présent dans la rotation (tableau 22). Les teneurs moyennes des pétioles en NO_3 , toutes rotations et années confondues, sont de 488 mg/L pour la dose 0 kg N/ha, de 1314 mg/L pour la dose 45 kg N/ha, de 2946 mg/L pour la dose 90 kg N/ha, de 4701 mg/L pour la dose 135 kg N/ha et de 5283 mg/L pour la dose 180 kg N/ha (tableau 23).

Dans l'ensemble, la teneur en NO_3 des pétioles de pommes de terre au moment de la floraison a tendance à suivre l'augmentation de la fertilisation en N : plus la dose d'azote appliquée au sol est élevée, plus le contenu en nitrates des pétioles est élevé et la relation est linéaire aux doses étudiées. Une représentation graphique des teneurs en NO_3 des pétioles en fonction des doses d'azote pour l'ensemble des rotations pour les années 2001 et 2003 (interaction P x N non significative) est présentée aux figures 6 et 7. Pour l'année 1999, étant donné que l'interaction P x N est significative, une droite de régression a été calculée pour chaque précédent (graphiques non présentés). À partir de ces données, il est possible de déterminer le niveau de nitrates des pétioles au moment de la floraison qui est associé au rendement et à la fertilisation azotée optimale. Nous avons également établi ces valeurs pour un rendement maximal. On retrouve l'ensemble de ces données au tableau 24 de même que celles concernant l'indice de chlorophylle. À noter que dans ce tableau, la teneur en azote est exprimée en mg/L de NO_3 et également en mg/L de N- NO_3 . En 1999, le niveau de NO_3 associé au rendement optimal se situait entre 3167 mg/L et 4129 mg/L. Il allait de 3895 mg/L à 5083 en 2001 et de 4603 mg/L à 5849 mg/L en 2003.

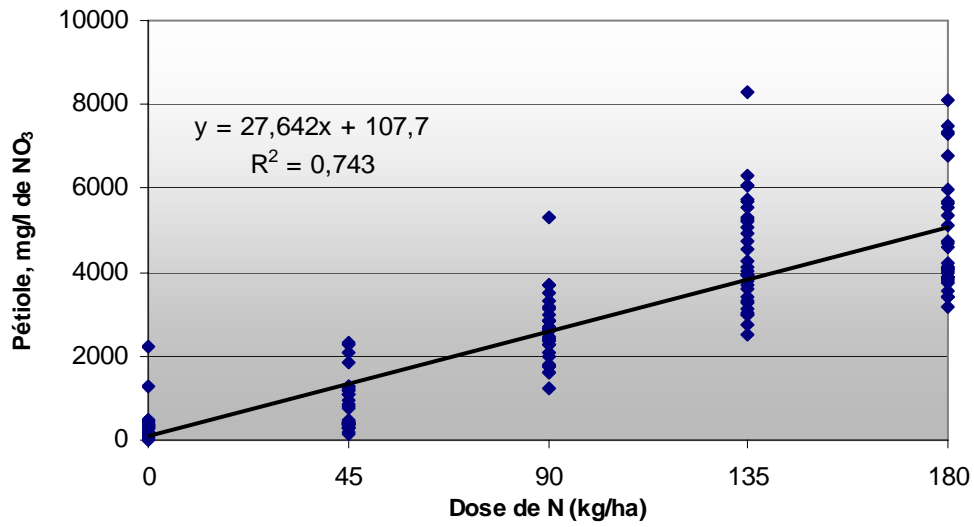


Figure 6. Relation entre le contenu en NO₃ des pétioles des feuilles et les doses d'azote pour l'ensemble des systèmes de rotation, au stade pleine floraison de la pomme de terre, Deschambault, 2001.

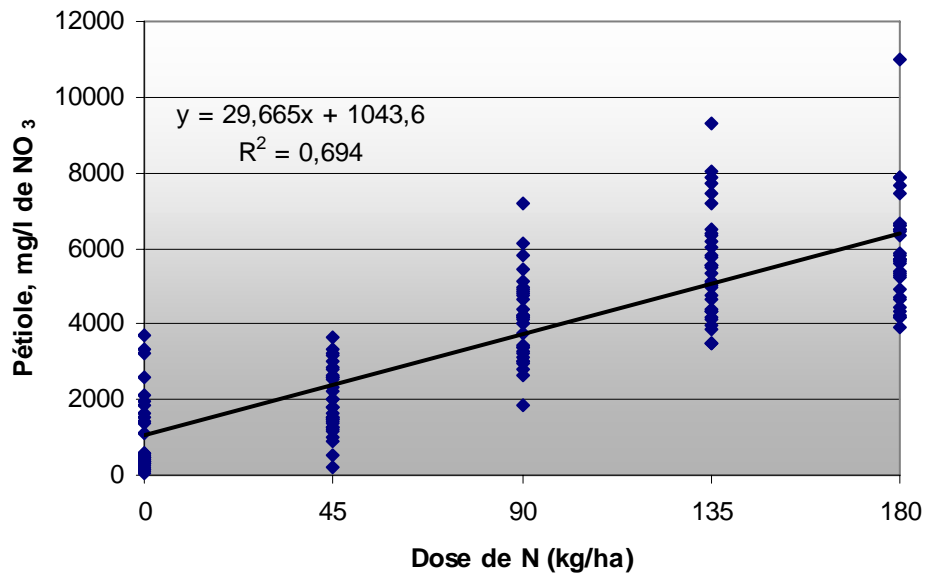


Figure 7. Relation entre le contenu en NO₃ des pétioles des feuilles et les doses d'azote pour l'ensemble des systèmes de rotation, au stade pleine floraison de la pomme de terre, Deschambault, 2003.

Dans le cadre de nos travaux, nous avons également mesuré les niveaux de nitrates et des indices de chlorophylle à d'autres stades que la pleine floraison. Pour les années 1999, 2001, 2003, les données des rendements en pommes de terre pour les différentes cultures de rotation, couplées aux données de Nitratecheck et de SPAD 502 pour les trois derniers stades de développement de la plante, ont permis de produire deux droites de régression dont l'une est associée au contenu en nitrates à maintenir dans les feuilles afin d'atteindre le rendement

maximal et une seconde pour atteindre 95 % de celui-ci. Le même exercice a été fait pour l'indice de chlorophylle. À partir des équations de régression, nous avons déterminé les niveaux de nitrates et les indices de chlorophylle à maintenir au niveau du feuillage pour chacun des quatre stades. On retrouve ces données pour le stade pleine floraison au tableau 25. À titre de référence, nous avons au même tableau des niveaux de N-NO₃ proposés par d'autres auteurs. Ces données vont de 900 à 1400 ppm.

Pour clore cette partie du travail sur les nitrates, mentionnons que la précision de l'appareil Nitracheck, est apparue satisfaisante par rapport à une analyse conventionnelle de laboratoire. La régression linéaire simple entre la teneur des pétioles en N-NO₃, déterminée à l'aide du Nitracheck et les analyses de laboratoire donne un R² de 0,98. Toutefois, les mesures faites au champ apparaissent légèrement plus faibles selon la relation déterminée par la formule $y = 1,0936x + 14,724$, la valeur de x étant la teneur en N-NO₃ mesurée avec le Nitracheck.

Tableau 21. Analyse de la variance de l'effet de différents précédents culturaux et du niveau de fertilisation azotée sur un indice de chlorophylle (IC) des feuilles et le contenu en nitrates des pétioles de pommes de terre, à la pleine floraison, cv. Shepody, Deschambault, 1999, 2001 et 2003.

Précédent	Dose N kg/ha	1999 ⁽¹⁾		2001 ⁽²⁾		2003 ⁽³⁾	
		IC	NO ₃ pétiole mg/L	IC	NO ₃ pétiole mg/L	IC	NO ₃ pétiole mg/L
Canola	0	31,6	46,6	32,7	204,5	33,3	626,6
	45	33,3	1261,0	32,2	1043,8	33,9	2079,1
	90	35,0	2157,1	35,4	2150,5	35,2	3725,1
	135	39,1	4356,8	35,9	4415,2	38,2	5434,8
	180	40,6	5207,0	36,3	4321,0	39,9	5523,1
Maïs	0	31,9	21,2	32,4	226,8	31,5	243,4
	45	31,9	390,0	32,6	1003,6	33,0	1408,1
	90	33,8	1663,6	33,4	2045,7	35,6	4357,2
	135	37,7	3333,6	35,5	4764,2	38,2	5294,2
	180	40,1	4829,0	36,4	5045,3	38,3	5633,3
Orge	0	31,8	124,6	33,1	359,6	32,2	832,2
	45	32,8	1057,3	32,7	506,5	33,3	2113,3
	90	35,6	2036,7	35,0	2942,5	35,8	4363,5
	135	38,0	4083,4	35,4	4587,1	37,8	5602,7
	180	40,4	5086,9	35,9	5161,6	39,1	5788,9
Orgegr	0	32,2	198,7	32,8	1072,2	34,4	3197,2
	45	34,3	2482,2	33,3	947,2	35,4	3169,7
	90	37,0	3137,1	36,3	3781,2	36,9	4841,4
	135	38,8	4524,4	37,2	4567,6	38,0	6837,8
	180	41,7	4878,8	36,7	5294,3	38,0	6180,6
Orgemout	0	32,7	34,5	32,6	257,9	33,2	1494,6
	45	32,5	924,6	32,6	695,5	33,4	1502,1
	90	34,5	2048,0	35,5	2464,4	35,8	4049,8
	135	37,1	4457,6	36,3	4635,0	38,2	4725,8
	180	41,2	5370,8	36,8	4913,9	38,9	5146,2
Pdt	0	29,5	25,3	33,1	320,3	31,9	341,9
	45	31,8	935,4	33,7	923,8	32,7	1044,4
	90	34,1	1796,2	35,0	2421,0	35,8	3675,4
	135	36,2	4487,0	36,2	4551,8	37,9	5845,4
	180	38,9	5105,7	37,0	5006,9	38,6	5021,8

(Suite tableau 21)

Précédent	Dose N kg/ha	1999 ⁽¹⁾		2001 ⁽²⁾		2003 ⁽³⁾	
		IC	NO ₃ pétiole mg/L	IC	NO ₃ pétiole mg/L	IC	NO ₃ pétiole mg/L
Pois	0	31,6	111,9	33,2	242,1	32,7	469,3
	45	33,3	1246,2	32,2	658,0	34,2	2105,7
	90	34,1	2474,5	35,4	2344,3	36,5	4425,6
	135	37,2	3865,8	35,1	4085,3	37,7	4938,6
	180	39,6	5292,7	37,0	4013,8	39,2	7372,5
Soya	0	31,5	47,5	32,4	239,0	33,9	981,6
	45	32,7	1060,1	33,9	768,2	35,0	2220,3
	90	34,6	1681,9	34,2	2550,8	36,2	3560,0
	135	36,8	3727,7	35,2	3789,6	37,5	5930,6
	180	40,8	5677,3	37,3	4496,2	38,7	6432,8
F (p) P		12,50(<0,0001)	3,07(0,022)	2,93(<0,0263)	3,31(0,0156)	0,78(0,6095)	2,92(0,0269)
F (p) N		92,47(<0,0001)	137,62(<0,0001)	53,82(<0,0001)	42,96(<0,0001)	49,87(<0,0001)	118,81(<0,0001)
F (p) P x N		1,11(0,345)	1,81(0,020)	1,78(0,0233)	0,99(0,4895)	1,84(0,0171)	1,07(0,3878)
CV %		3,2	20,5	2,5	24,0	2,7	28,9
ppds P		0,6	518,8	0,7	476,2	2,2	1017,1
ppds D		1,05	500,5	0,7	872,5	1,0	556,5

Orgegr : orge grainée avec le trèfle rouge; orgemout : orge + moutarde blanche après la récolte d'orge; pdt : pomme de terre.

(1) pleine floraison le 13 juillet, (2) pleine floraison le 16 juillet, (3) pleine floraison le 21 juillet

Tableau 22. Effet du précédent cultural sur le contenu en nitrates des pétioles de pommes de terre à la pleine floraison, toutes doses d'azote confondues, cv. Shepody, Deschambault, 1999, 2001 et 2003.

Précédent	NO ₃ des pétioles (mg/L)			
	1999	2001	2003	Moyenne
Canola	2606	2427	3478	2837
Maïs	2048	2617	3387	2684
Orge	2478	2712	3740	2977
Ogregr	3044	3133	4845	3674
Orgemout	2567	2593	3383	2848
Pois	2598	2269	3862	2910
Soya	2439	2369	3825	2878
Pdt	2470	2645	3186	2767
F(p)	---	3,31(0,0156)	2,92(0,0269)	---
ppds	---	476	1017	---

Orgegr : orge grainée avec le trèfle rouge; orgemout : orge + moutarde blanche après la récolte d'orge; pdt : pomme de terre.

Tableau 23. Effet de la dose d'azote sur le contenu en nitrates des pétioles de pommes de terre à la pleine floraison, tous systèmes de rotation confondus, cv. Shepody, Deschambault, 1999, 2001 et 2003.

Dose de N kg/ha	NO ₃ des pétioles (mg/L)			
	1999	2001	2003	Moyenne
0	76	365	1023	488
45	1170	818	1955	1314
90	2124	2588	4125	2946
135	4104	4425	5576	4701
180	5181	4782	5887	5283
F(p)				
Contrastes				
Linéaire	---	163,5 (<0,0001)	453,0 (<0,0001)	---
Quadratique	---	0,01(0,9160)	6,97 (0,0215)	---

Tableau 24. Niveau de nitrates des pétioles et indice de chlorophylle des feuilles au moment de la pleine floraison qui permettent d'atteindre un rendement optimal et maximal, cv. Shepody, Deschambault, 1999, 2001 et 2003.

Année		NO ₃	N-NO ₃ ⁽¹⁾	IC
		mg/L		
1999	N opt..	3167-4129	716-933	36,4-38,1
	N max.	3262-4204	737-950	36,5-38,3
2001	N opt..	3895-5083	880-1149	36,0-36,9
	N max.	4060-5222	918-1180	36,1-37,1
2003	N opt..	4603-5849	10401321	37,2-38,3
	N max.	4781-6057	1081-1369	37,3-38,6

(1) NO₃ x 0,226 = N-NO₃

Tableau 25. Niveaux de N-NO₃ à maintenir dans les pétioles de pommes de terre afin d'obtenir un rendement adéquat selon différentes institutions.

Institution	Stade de la pomme de terre	N-NO ₃ ppm	IC
IRDA	Pleine floraison	900-1250	37,9-39,6
Université de Floride ⁽¹⁾	100 % en fleurs	900-1200	---
Université de l'état du Michigan ⁽²⁾	Entre le 1 ^{er} et le 20 juillet	1000-1400	---
Université de Saskatchewan ⁽³⁾	Pleine floraison	950-1300	---

(1) Hochmuth, G., (2) Vitosh, M. et G. Silva, (3) Waterer, D.

Au tableau 21, on retrouve les indices de chlorophylle des feuilles au moment de la pleine floraison. Ces indices ont été très affectés par les systèmes de rotation en 1999 ($p < 0,0001$) et en 2001 ($p = 0,0263$) mais pas en 2003 ($p = 0,6095$). Les indices de chlorophylle ont également été très affectés par les doses d'azote pour toutes ces années ($p < 0,0001$). L'interaction précédent-dose n'est pas significative en 1999 mais elle l'est pour 2001 et 2003.

Les indices moyens de chlorophylle des feuilles, toutes doses d'azote confondues, ont été plus élevés pour l'orge grainée avec le trèfle rouge (tableau 26). Ces mêmes indices, toutes rotations et années confondues, sont de 32,4 pour la dose 0 kg N/ha, de 33,2 pour la dose 45 kg N/ha, de 35,3 pour la dose 90 kg N/ha, de 37,1 pour la dose 135 kg N/ha et de 38,6 pour la dose 180 kg N/ha. (tableau 27). L'indice de chlorophylle peut également constituer un indicateur utile pour déterminer si les besoins en N ont été comblés adéquatement. Dans ce cas-ci, l'indice mesuré au moment de la floraison a tendance à suivre l'augmentation de la fertilisation en N; plus la dose d'azote appliquée au sol est élevée, plus l'indice chlorophyllien est élevé et la relation linéaire apparaît la plus appropriée aux doses étudiées. La relation entre l'indice de chlorophylle et les doses d'azote pour l'année 1999 (interaction P x N non significative) est présentée à la figure 8. Pour les années 2001 et 2003, étant donné que l'interaction P x N est significative, une droite de régression a été calculée pour chaque précédent (graphiques non présentés). À partir de ces données, il est possible de déterminer un indice de chlorophylle, au moment de la floraison qui est associé au rendement optimal. En 1999, cet indice se situait entre 36,4 et 38,1. Il allait de 36,0 à 36,9 en 2001 et de 37,2 à 38,3 en 2003 (tableau 24).

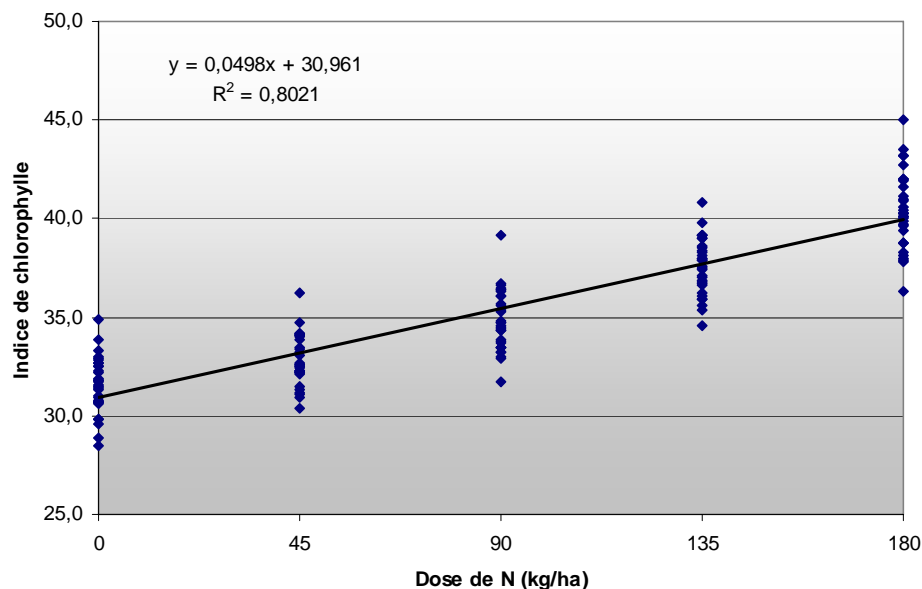


Figure 8. Relation entre l'indice de chlorophylle des feuilles et les doses d'azote pour l'ensemble des systèmes de rotation, au stade pleine floraison de la pomme de terre, Deschambault, 1999.

Comme nous l'avons déjà mentionné pour les teneurs en nitrates des pétioles, nous avons mesuré des indices de chlorophylle à d'autres stades que la pleine floraison. Les données des rendements en pommes de terre pour les différentes cultures de rotation, pour les années 1999, 2001 et 2003 et pour trois stades de développement de la plante, ont permis de produire deux droites de régression dont l'une est associée à un indice à maintenir dans les feuilles afin d'atteindre le rendement maximal et une seconde pour atteindre 95 % de celui-ci. On retrouve ces indices au tableau 25. Au stade pleine floraison, pour le cultivar Shepody, ils devraient se situer entre 37,9 et 39,6.

Tableau 26. Effet du précédent cultural sur l'indice de chlorophylle des feuilles de pommes de terre au moment de la pleine floraison, toutes les doses d'azote confondues, cv. Shepody, Deschambault, 1999, 2001 et 2003.

Précédent	Indice de chlorophylle			
	1999	2001	2003	Moyenne
Canola	35,9	34,5	36,1	35,5
Maïs	35,1	34,1	35,3	34,8
Orge	35,7	34,4	35,6	35,2
Ogregr	36,8	35,3	36,5	36,2
Orgemout	35,6	34,8	35,9	35,4
Pois	35,2	34,6	36,0	35,3
Soya	35,3	34,6	36,3	35,4
Pdt	34,1	35,0	35,4	34,8
F(p)	12,5 (<0,0001)	---	---	---
ppds	0,60	---	---	---

Orgegr : orge grainée avec le trèfle rouge; orgemout : orge + moutarde blanche après la récolte d'orge; pdt : pomme de terre.

Tableau 27. Effet de la dose d'azote sur l'indice de chlorophylle des feuilles de pommes de terre au moment de la pleine floraison, tous les systèmes de rotation confondus, cv. Shepody, Deschambault, 1999, 2001 et 2003.

Dose de N kg/ha	Indice de chlorophylle			
	1999	2001	2003	Moyenne
0	31,6	32,8	32,9	32,4
45	32,8	32,9	33,8	33,2
90	34,8	35,0	36,0	35,3
135	37,6	35,8	37,9	37,1
180	40,4	36,7	38,8	38,6
	F(p)			
Contrastes				
Linéaire	361,6 (<0,0001)	---	---	---
Quadratique	7,8 (0,0162)	---	---	---

Coefficient d'utilisation de l'azote des engrais

Le coefficient moyen d'utilisation de l'azote (CUN) des engrais azotés par la pomme de terre, toutes rotations et années confondues, a été de 64,6 % pour la dose 45 kg N/ha, 55,5 % pour la dose 90 kg N/ha, 47,9 % pour la dose 135 kg N/ha et 43,2 % pour la dose 180 kg N/ha (tableau 28). Ce coefficient décroît donc avec l'augmentation des doses d'azote apportées. Ce phénomène a également été mesuré dans le maïs-grain par Tran (1994) et dans le maïs-fourragier par Giroux et Lemieux (2006). Il existe aussi des différences importantes entre les rotations. La monoculture de pommes de terre a montré le plus faible CUN moyen suivie par le précédent incorporant le trèfle rouge. Nous avons déjà démontré que la fourniture d'azote par le sol et la dose optimale d'engrais N sont très différentes dans ces deux systèmes de rotation. Pour la pomme de terre en monoculture, le faible CUN peut s'expliquer par les rendements très bas obtenus. En absence de rotation, on peut présumer que les conditions de sol et de résidus de culture ne permettent pas une utilisation aussi efficace de l'azote, en limitant les rendements et les prélèvements N. D'autre part, les coefficients d'utilisation plus faibles sur retour d'orge grainée s'expliquent par une fourniture d'azote plus élevée par le sol et un faible besoin en engrais N. On peut en déduire que lorsque le sol fournit beaucoup d'azote, le N provenant des engrais n'est plus utilisé aussi efficacement; les kilogrammes de N en excès ne servent plus à l'élaboration du rendement et le CUN diminue; les plantes n'utilisent plus efficacement cet azote et les reliquats dans le sol risquent de s'accroître.

Il existe également des différences entre les années (tableaux 29, 30 et 31). En 1999, le CUN a été plus élevé qu'en 2001 et l'année 2003 a été celle où la mesure a été la plus faible. C'est aussi en 2003 que le CUN moyen le plus bas a été mesuré et ce pour une production de pommes de terre sur un retour d'orge avec la moutarde blanche, soit 39,7. Avec ce précédent, c'est en 2002 que nous avons retourné la plus importante quantité d'azote au sol (tableau 8). Une fois décomposés, ces résidus, qui ont eu un impact important sur le CUN, ont pu être utilisés par la pomme de terre en 2003. Ces quelques données démontrent la nécessité d'apporter des ajustements à la fertilisation azotée de la pomme de terre.

Tableau 28. Coefficient d'utilisation de l'azote des engrais N (CUN) par la pomme de terre, cv. Shepody, Deschambault, moyenne de 1999, 2001 et 2003.

Dose de N kg/ha	Précédent (CUN %)								Moyenne
	Canola	Maïs	Orge	Orgegr	Orgemout	Pdt	Pois	Soya	
45	71,1	59,4	69,8	60,7	61,9	50,6	76,5	66,6	64,6
90	57,5	52,2	49,1	52,7	58,4	48,1	64,3	61,5	55,5
135	50,1	52,9	49,4	43,4	46,2	38,1	49,6	53,2	47,9
180	46,3	49,9	44,8	37,5	44,5	34,8	44,4	43,4	43,2
Moyenne	56,2	53,6	53,3	48,6	52,8	42,9	58,7	56,2	52,7

Orgegr : orge grainée avec le trèfle rouge; orgemout : orge + moutarde blanche après la récolte d'orge; pdt : pomme de terre.

Tableau 29. Coefficient d'utilisation de l'azote des engrais N (CUN) par la pomme de terre, cv. Shepody, Deschambault 1999.

Dose de N kg/ha	Précédent (CUN %)								Moyenne
	Canola	Maïs	Orge	Orgegr	Orgemout	Pdt	Pois	Soya	
45	96,1	60,4	83,6	62,8	90,7	56,9	98,3	91,4	80,0
90	53,7	46,8	54,3	58,1	76,6	47,8	67,2	61,2	58,2
135	45,8	54,8	57,8	47,2	50,1	37,9	45,0	53,1	48,9
180	49,4	54,8	59,0	44,6	54,3	31,4	47,5	43,7	48,1
Moyenne	61,3	54,2	63,7	53,2	67,9	43,5	64,5	62,4	58,8

Orgegr : orge grainée avec le trèfle rouge; orgemout : orge + moutarde blanche après la récolte d'orge; pdt : pomme de terre.

Tableau 30. Coefficient d'utilisation de l'azote des engrais N (CUN) par la pomme de terre, cv. Shepody, Deschambault 2001.

Dose de N kg/ha	Précédent (CUN %)								Moyenne
	Canola	Maïs	Orge	Orgegr	Orgemout	Pdt	Pois	Soya	
45	55,3	72,0	55,7	59,3	52,0	47,8	52,5	49,8	55,5
90	65,7	55,9	43,5	62,4	52,9	48,1	60,3	64,2	56,6
135	56,0	59,3	47,2	45,7	48,8	30,6	62,3	55,9	50,7
180	46,5	51,6	39,3	42,6	48,9	35,6	42,3	48,1	44,3
Moyenne	55,9	59,7	46,4	52,5	50,7	40,5	54,3	54,5	51,8

Orgegr : orge grainée avec le trèfle rouge; orgemout : orge + moutarde blanche après la récolte d'orge; pdt : pomme de terre.

Tableau 31. Coefficient d'utilisation de l'azote des engrais N (CUN) par la pomme de terre, cv. Shepody, Deschambault 2003.

Dose de N kg/ha	Précédent								Moyenne
	Canola	Maïs	Orge	Orgegr	Orgemout	Pdt	Pois	Soya	
	CUN %								
45	61,7	45,7	70,2	60,1	43,1	47,1	78,7	58,6	58,1
90	52,9	54,0	49,4	37,7	45,8	48,5	65,4	59,2	51,6
135	48,7	44,6	43,3	37,5	39,7	45,8	41,6	50,5	44,0
180	42,8	43,2	36,1	25,3	30,4	37,3	43,3	38,4	37,1
Moyenne	51,5	46,9	49,7	40,1	39,7	44,7	57,3	51,7	47,7

Orgegr : orge grainée avec le trèfle rouge; orgemout : orge + moutarde blanche après la récolte d'orge; pdt : pomme de terre.

Indicateurs de fertilité azotée des sols et capacité de prédiction de la dose optimale d'azote

Les indicateurs de fertilité azotée présentés dans ce chapitre sont le contenu en nitrates des sols au moment de la plantation et au buttage de la pomme de terre, le niveau de nitrates des pétioles et l'indice de chlorophylle mesurés au moment de la pleine floraison. L'ensemble de ces données sont issues des parcelles sans engrais azoté. Pour déterminer le potentiel de ces indicateurs de fertilité, nous avons mesuré les relations entre le rendement relatif (RR) et ces indicateurs pour les 32 unités expérimentales (huit types de rotation x 4 répétitions) et pour les années 1999, 2001, 2003 et 2005 (tableaux 32, 33 34 et 35). En 2005, seuls les nitrates au sol ont été mesurés. Les coefficients de corrélation (r) entre RR et le contenu en nitrates des sols au moment de la plantation et au buttage sont respectivement de 0,61 et 0,68 en 1999, de 0,51 pour les deux périodes en 2001, de 0,77 et 0,52 en 2003 et de 0,66 et 0,44 en 2005.

Entre le RR et le contenu en nitrates des pétioles, le coefficient de corrélation s'établit à 0,69 en 1999, à 0,29 en 2001 et à 0,73 en 2003. En ce qui regarde l'indice de chlorophylle, le coefficient r est de 0,42 en 1999, non significatif en 2001 et de 0,35 en 2003. Il nous apparaît donc que dans le cadre de nos travaux, le contenu en nitrates des pétioles dans les parcelles sans N présente un meilleur indicateur que l'indice de chlorophylle.

Tableau 32. Analyse de la variance et matrice de corrélations linéaires simples entre les rendements relatifs, les prélèvements relatifs d'azote, la dose optimale de N, la teneur en nitrates des sols, la teneur en nitrates des pétioles et l'indice de chlorophylle (IC) à la pleine floraison dans les parcelles sans engrais N, cv. Shepody, Deschambault, 1999.

Précédent	Rend. relatif	Prélèv. relatif	N opt kg/ha	Prélèv. N tubercule kg N/ha	N tubercule %	NO ₃ pétiole mg/L	IC	N-NO ₃	
								plantation	buttage
								mg/kg	
Canola	57,9	44,3	138	51,5	1,0635	46,6	31,6	6,23	13,65
Maïs	46,1	31,7	168	49,5	1,1040	21,2	31,9	4,53	14,67
Orge	63,0	37,6	137	63,1	0,9241	124,6	31,8	7,62	18,33
Orgegr	75,0	49,3	106	91,9	1,1533	198,7	32,2	12,36	24,64
Orgemout	55,9	42,3	137	57,6	1,0338	34,5	32,7	6,78	14,65
Pdt	58,5	39,2	132	39,3	1,1350	25,3	29,5	7,72	13,8
Pois	62,1	47,0	143	64,9	1,0598	111,9	31,6	7,44	16,07
Soya	57,8	44,7	139	58,7	1,0488	47,5	31,5	7,19	14,81
F (p)	3,85(0,0076)	2,65(0,0443)	2,77(0,0331)	4,26(0,0045)	0,75(0,6359)	1,90(0,1199)	3,18(0,0187)	3,48(0,0132)	2,94(0,0261)
CV %	13,9	16,8	14,6	25,1	15,4	119,5	3,4	31,8	26,3
Ppds	13,1	12,3	34,3	23,2	---	170,37	1,76	3,8	7,2
Coefficient de corrélation (r)									
RR	1,00	0,59	0,62	0,78	---	0,69	0,24	0,61	0,68
PR		1,00	0,50	0,71	---	0,39	0,21	0,62	0,36
N opt			1,00	0,37	---	0,42	0,26	0,29	0,44
Prélèv. N				1,00	---	0,70	0,41	0,59	0,65
N tuber %					---	---	---	---	---
NO ₃ feuille						1,00	0,32	0,33	0,67
IC							1,00	0,13	0,36
N-NO ₃ plantation								1,00	0,43
N-NO ₃ buttage									1,00

Orgegr : orge grainée avec le trèfle rouge; orgemout : orge + moutarde blanche après la récolte d'orge; pdt : pomme de terre.

Tableau 33. Analyse de la variance et matrice de corrélations linéaires simples entre les rendements relatifs, les prélèvements relatifs d'azote, la dose optimale de N, la teneur en nitrates des sols, la teneur en nitrates des pétioles et l'indice de chlorophylle (IC) à la pleine floraison dans les parcelles sans engrais N, cv. Shepody, Deschambault, 2001.

Précédent	Rend. relatif	Prélèv. relatif	N opt kg/ha	Prélèv. N tubercule kg N/ha	N tubercule %	NO ₃ pétiole mg/L	IC	N-NO ₃			
								plantation	buttage		
		%								mg/kg	
Canola	50,7	37,5	157,9	56,4	1,099	204,5	32,7	3,72	9,29		
Maïs	52,5	35,3	164,3	53,3	1,051	226,8	32,4	4,01	10,92		
Orge	62,6	47,9	176,5	64,7	1,020	359,6	33,1	5,15	11,59		
Orgegr	72,6	49,7	151,0	78,1	1,137	1072,3	32,8	6,78	17,80		
Orgemout	63,5	43,6	167,5	65,6	1,009	257,9	32,6	5,78	12,69		
Pdt	60,6	41,5	173,6	45,2	1,293	320,3	33,1	5,77	11,40		
Pois	53,3	37,0	164,5	56,2	1,062	242,1	33,2	5,01	12,25		
Soya	58,3	39,7	163,3	60,9	1,085	239,0	32,4	5,95	11,30		
F (p)	2,22(0,074)	1,82(0,1355)	0,70(0,6681)	1,68(0,1681)	1,4(0,2554)	1,97(0,1092)	0,35(0,9214)	2,45(0,0547)	4,90(0,0021)		
CV %	16,1	18,7	11,8	25,2	13,9	15,3	3,1	25,5	18,5		
Ppds	16,8	---	---	---	---	622,4	---	3,8	3,4		
Coefficient de corrélation (r)											
RR	1,00	0,82	---	---	---	0,29	---	0,51	0,51		
PR		1,00	---	---	---	0,34	---	0,32	0,64		
N opt			---	---	---	---	---	---	---		
Prélèv. N				---	---	---	---	---	---		
N tuber %					---	---	---	---	---		
NO ₃ feuille						1,00	---	0,08	0,48		
IC							---	---	---		
N-NO ₃ plantation								1,00	0,48		
N-NO ₃ buttage									1,00		

Orgegr : orge grainée avec le trèfle rouge; orgemout : orge + moutarde blanche après la récolte d'orge; pdt : pomme de terre.

Tableau 34. Analyse de la variance et matrice de corrélations linéaires simples entre les rendements relatifs, les prélèvements relatifs d'azote, la dose optimale de N, la teneur en nitrates des sols, la teneur en nitrates des pétioles et l'indice de chlorophylle (IC) à la pleine floraison dans les parcelles sans engrais N, cv. Shepody, Deschambault, 2003.

Précédent	Rend. relatif	Prélèv. relatif	N opt kg/ha	Prélèv. N tubercule kg N/ha	N tubercule %	NO ₃ pétiole mg/L	IC	N-NO ₃			
								plantation	buttage		
		%								mg/kg	
Canola	54,9	42,2	146	50,4	1,20	626,6	33,3	4,3	8,14		
Maïs	53,1	37,4	153	45,4	1,18	243,4	31,5	3,63	5,85		
Orge	60,5	46,0	153	52,5	1,13	832,2	32,2	4,32	8,3		
Orgegr	75,3	60,5	123	75,4	1,40	3197,2	34,4	9,18	16,67		
Orgemout	67,7	52,4	136	65,8	1,23	1494,6	33,2	6,15	9,33		
Pdt	58,3	42,4	153	44,6	1,28	341,9	31,9	4,96	8,33		
Pois	53,1	40,7	141	44,6	1,16	469,3	32,7	4,63	6,36		
Soya	58,3	41,4	130	53,5	1,24	981,6	33,9	4,9	8,23		
F (p)	5,28(0,0014)	4,45(0,0036)	1,15(0,3687)	8,15(<0,0001)	2,62(0,0413)	21,37(<0,0001)	2,26(0,0701)	9,01(<0,0001)	6,75(0,0003)		
CV %	11,2	15,8	15,0	13,5	8,5	40,8	4,1	22,1	28,9		
Ppds	10,1	11,0	---	10,5	0,180	564,0	2,4	1,6	3,7		
Coefficient de corrélation (r)											
RR	1,00	0,90	---	0,90	0,51	0,73	0,35	0,77	0,52		
PR		1,00	---	0,85	0,59	0,70	0,37	0,73	0,48		

(Suite tableau 34)

Précédent	Rend. relatif	Prélèv. relatif	N opt kg/ha	Prélèv. N tubercule kg N/ha	N tubercule %	NO ₃ pétiole mg/L	IC	N-NO ₃	
	%							plantation	Précédent
								mg/kg	
N opt			---	---	---	---	---	---	---
Prélèv. N				1,00	0,71	0,74	0,31	0,78	0,42
N tuber %					1,00	0,48	0,06	0,54	0,36
NO ₃ feuille						1,00	0,54	0,78	0,75
IC							1,00	0,51	0,37
N-NO ₃ plantation								1,00	0,64
N-NO ₃ buttage									1,00

Orgegr : orge grainée avec le trèfle rouge; orgemout : orge + moutarde blanche après la récolte d'orge; pdt : pomme de terre.

Tableau 35. Analyse de la variance et matrice de corrélations linéaires simples entre les rendements relatifs, la dose optimale de N et la teneur en nitrates des sols dans les parcelles sans engrais N, cv. Shepody, Deschambault, 2005.

Précédent	Rend. relatif	Prélèv. relatif	N opt kg/ha	Prélèv. N tubercule kg N/ha	N tubercule %	NO ₃ pétiole mg/L	IC	N-NO ₃	
	%							plantation	Précédent
								mg/kg	
Canola	54,9	---	146	---	---	---	---	4,3	8,14
Mais	53,1	---	153	---	---	---	---	3,63	5,85
Orge	60,5	---	153	---	---	---	---	4,32	8,3
Orgegr	75,3	---	123	---	---	---	---	9,18	16,67
Orgemout	67,7	---	136	---	---	---	---	6,15	9,33
Pdt	58,3	---	153	---	---	---	---	4,96	8,33
Pois	53,1	---	141	---	---	---	---	4,63	6,36
Soya	58,3	---	130	---	---	---	---	4,9	8,23
F (p)	7,17(<0,0001)	---	1,62(0,1683)	---	---	---	---	7,01(<0,0001)	2,51(0,0366)
CV %	9,9	---	12,7	---	---	---	---	22,4	31,7
Ppds	7,7	---	---	---	---	---	---	1,1	4,7
Coefficient de corrélation (r)									
RR	1,00	---	---	---	---	---	---	0,66	0,44
PR		---	---	---	---	---	---	---	---
N opt			---	---	---	---	---	---	---
Prélèv. N				---	---	---	---	---	---
N tuber %					---	---	---	---	---
NO ₃ feuille						---	---	---	---
IC							---	---	---
N-NO ₃ plantation								1,00	0,45
N-NO ₃ buttage									1,00

Orgegr : orge grainée avec le trèfle rouge; orgemout : orge + moutarde blanche après la récolte d'orge; pdt : pomme de terre.

Avec pour objectif de bâtir une grille de fertilisation azotée de la pomme de terre en fonction de la teneur du sol en nitrates à la plantation et au buttage, nous avons déterminé la relation entre le rendement relatif (RR) et la dose optimale N mesurée dans 29 unités expérimentales dont les doses optimales ne dépassaient pas la dose maximale (180 kg/ha) utilisée au cours de nos travaux, et ce pour l'année 1999 (figure 9). En 2001 et 2003, les valeurs optimales de N mesurées n'étaient pas significatives et cette relation n'a pas été déterminée pour ces années.

En 1999, la valeur de F pour la régression rendement relatif / dose optimale N est de 17,6 (p = 0,0003) avec R^2 de 0,389.

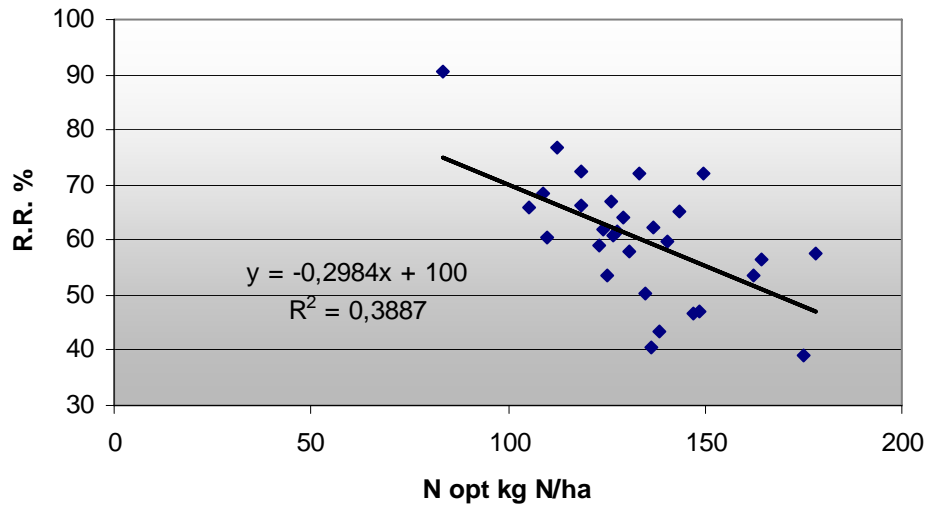


Figure 9. Relation entre la dose optimale d'azote (N_{opt}) de la pomme de terre et le rendement relatif (R.R.), Deschambault, 1999.

Nous avons associé le rendement relatif à la teneur des sols en nitrates (figures 10 et 11). Les coefficients de détermination (R^2) pour les régressions rendement relatif / teneur en nitrates des sols à la plantation et au buttage, sont respectivement de 0,356 et 0,445. À partir de là, pour un même rendement relatif, nous avons une dose optimale de N associée aux teneurs en nitrates des sols à la plantation et au buttage. L'ensemble de ces données ont permis de bâtir une grille proposant une dose optimale de N en fonction de la teneur en nitrates des sols (tableau 36).

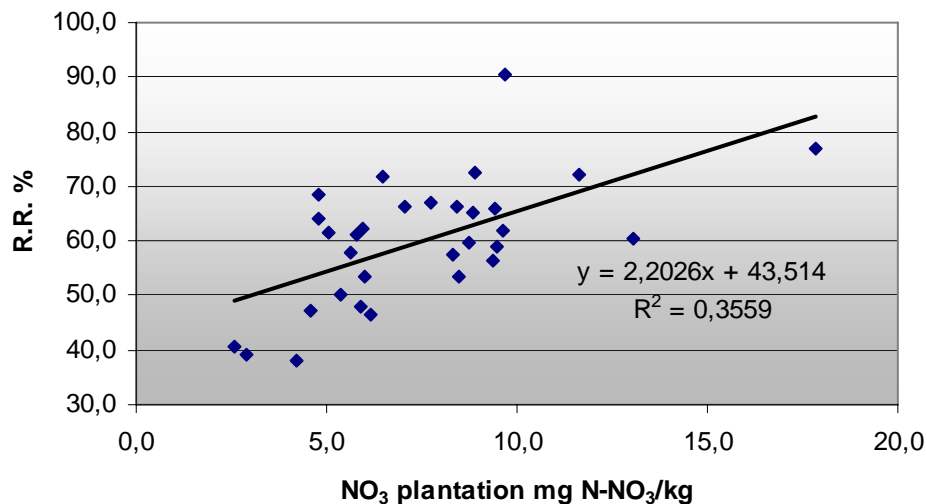


Figure 10. Relation entre le rendement relatif (R.R.) de la pomme de terre et la teneur en nitrates des sols à la plantation, Deschambault, 1999.

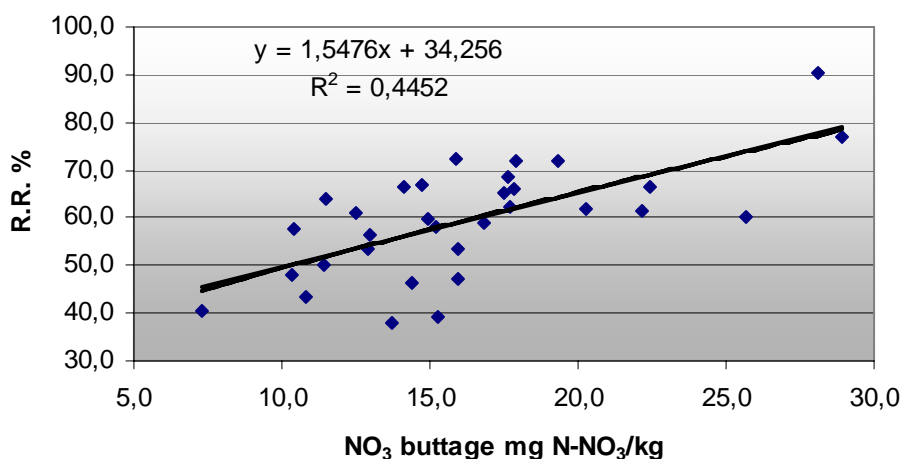


Figure 11. Relation entre le rendement relatif (R.R.) de la pomme de terre et la teneur en nitrates des sols au buttage, Deschambault, 1999.

Au Québec, peu de grilles de fertilisation de la pomme de terre en fonction de la teneur en nitrates des sols ont été proposées. À notre connaissance, seul Painchaud (1997) a réalisé un tel exercice. À titre comparatif, on retrouve les deux grilles au tableau 37. Dans son article, Painchaud souligne que les R^2 entre les teneurs en nitrates au sol au moment de la plantation et au buttage et la fertilisation azotée sont respectivement de 0,46 et de 0,40. Ces coefficients sont semblables à ce que nous avons mesuré. À partir des données du tableau 37, on constate que les deux grilles concordent assez bien pour les teneurs en nitrates du sol; teneurs qu'on pourrait qualifier d'intermédiaires. Pour les valeurs N-NO₃ les plus élevées à la plantation et les plus basses au buttage, les différences sont plus importantes.

Au Nouveau-Brunswick, un travail de recherche de Bélanger et al. (2001) sur la fertilisation azotée de la pomme de terre en relation avec la teneur en nitrates des sols à la plantation, a amené les auteurs à conclure que cet indicateur n'est pas adéquat comme seul critère de prédiction des besoins en azote de la pomme de terre. Ils attribuent cette difficulté au fait que la teneur en nitrates des sols au printemps est relativement faible dans un environnement froid et humide comme celui du Nouveau-Brunswick. Ils soulignent également que d'autres auteurs ont démontré qu'en situation de faibles teneurs en nitrates des sols, par rapport à une culture aussi exigeante en azote que la pomme de terre, la relation entre la teneur des sols en nitrates et le besoin en N de la pomme de terre est faible.

À partir de toutes ces considérations, nous sommes tout de même d'avis que des grilles comme celles proposées aux tableaux 36 et 37 peuvent servir de base pour une approche raisonnée de la fertilisation azotée de la pomme de terre sous nos conditions. Nous pensons aussi qu'en cours de saison, il est nécessaire de disposer de données additionnelles qui permettraient de tenir compte des particularités des sols, du climat, des cultivars etc. et d'apporter, si nécessaire, des correctifs à la fertilisation azotée de départ. C'est dans ce contexte que nous pensons que le suivi de la teneur en nitrates des pétioles et de l'indice de chlorophylle des feuilles est utile. Les données que nous proposons au tableau 25 peuvent aider dans ce sens.

Tableau 36. Doses optimales d'azote selon les rendements relatifs (RR) en pommes de terre et la teneur en N-NO₃ des sols à la plantation et au buttage, cv. Shepody, Deschambault 1999.

RR %	Dose optimale N kg/ha	N-NO ₃ plantation	N-NO ₃ buttage
		mg/kg	
30	235	<1,0	<3,7
35	218	<1,0	<3,7
40	201	<1,0	3,7
45	184	1,0	6,9
50	168	2,9	10,2
55	151	5,2	13,4
60	134	7,5	16,6
65	117	9,8	19,9
70	101	11,9	23,1
75	84	14,3	26,3
80	67	16,6	29,6
85	50	18,9	32,8
90	34	21,2	36,0
95	17	23,4	39,3
100	0	25,7	42,5

Tableau 37. Comparaison des grilles de fertilisation azotée de la pomme de terre en fonction du niveau de N-NO₃ mesuré dans la strate 0-30 cm du sol au moment de la plantation et au buttage.

N-NO ₃ plantation mg/kg	Dose N		N-NO ₃ buttage mg/kg	Dose N	
	IRDA	Painchaud		IRDA	Painchaud
	kg/ha			kg/ha	
2,0	175	187			
4,0	160	173	4,0	199	158
6,0	146	160	6,0	189	151
8,0	131	147	8,0	179	145
10,0	116	133	10,0	168	139
12,0	101	120	12,0	158	132
14,0	86	107	14,0	148	125
16,0	72	93	16,0	137	118
18,0	57	80	18,0	127	111
20,0	42	67	20,0	117	104
			22,0	106	97
			24,0	96	90
			26,0	86	83

Bilan prévisionnel d'azote

Il est également possible d'établir la dose optimale N en combinant une approche de bilan prévisionnel d'azote avec les indicateurs de fertilité azotée des sols que sont les nitrates. Le bilan prévisionnel évalue les besoins en azote de la plante associés à un rendement visé et détermine la proportion de l'azote qui sera comblée par le sol et par les engrais. Pour appliquer cette technique de calcul, il faut connaître certains paramètres dont l'objectif de rendement, le besoin en N/tonne, le coefficient d'utilisation de l'azote des engrais et la fourniture d'azote par le sol. Dans le cas du bilan prévisionnel que nous présentons ici, c'est la relation entre le prélèvement relatif et les nitrates au sol à la plantation qui a été utilisée. Celle entre le prélèvement relatif et la teneur des sols en nitrates au buttage ne présentait pas de valeur de F significative et n'a pas été retenue. Dans le cas de la régression prélèvement relatif / teneur en nitrates des sols à la plantation, on note une valeur F hautement

significative, ($F = 21,92$ $p < 0,0001$) avec des R^2 de 0,44 (figure 12). C'est donc cette relation que nous avons utilisée pour déterminer la dose optimale d'engrais N.

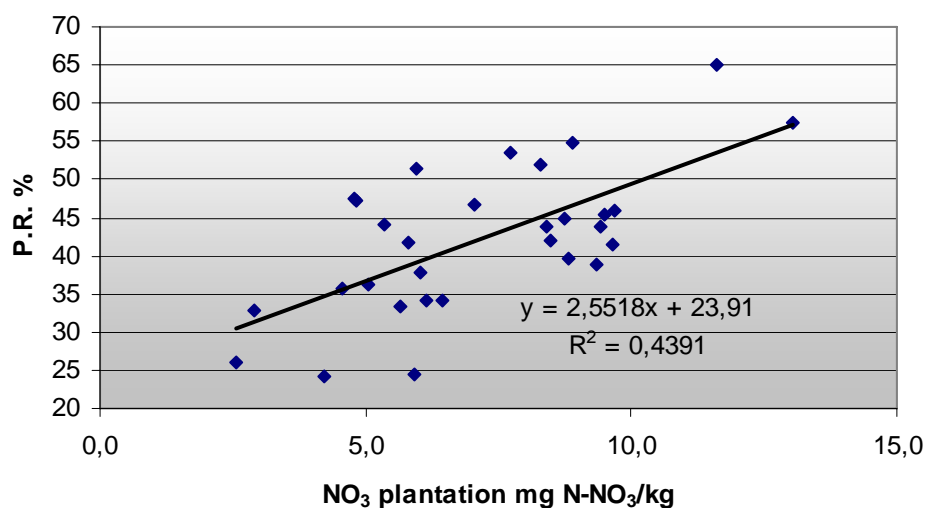


Figure 12. Relation entre le prélèvement relatif (P.R.) de la pomme de terre et la teneur en nitrates des sols à la plantation, Deschambault, 1999.

Les équations du bilan d'azote utilisées dans les calculs sont celles proposées par Giroux et Lemieux (2006).

- (1) Besoin N = Fourniture N (sol) + fourniture N (engrais)
- (2) Besoin N = Rendement visé x prélèvement N/tonne
- (3) Fourniture N (sol) = Besoin N x prélèvement relatif (PR)
- (4) Rendement visé x prélèv. N/tonne = (Besoin N x PR) + dose N x CUN

L'équation du bilan prévisionnel d'azote a été résolue pour un rendement visé en pommes de terre de 37 tonnes/ha et en considérant un prélèvement optimal de 4,5 kg N/t (3,5 kg N/t de tubercules + 1 kg N pour le feuillage), soit un besoin N à combler de 166,5 kg N/ha (équation 2). La fourniture N (sol) est déterminée par l'équation 3. Elle est calculée en multipliant le besoin en N de la culture par le prélèvement relatif. La dose optimale d'azote correspondant à chaque valeur de PR a été calculée à partir de l'équation 4 en supposant une valeur de 0,50 pour CUN. Le tableau 38 présente les doses optimales N associées aux différentes valeurs PR et aux valeurs correspondantes des teneurs en nitrates des sols à la plantation selon l'approche bilan. L'intérêt de la méthode du bilan est qu'il est possible de tenir compte de l'objectif de rendement de la culture, du besoin optimal d'azote par tonne et du coefficient d'utilisation de l'azote des engrais. La capacité prédictive de la dose optimale d'azote déterminée à partir du bilan N, dépend directement de la capacité des indicateurs de fertilité à fournir une indication valable du prélèvement relatif. Il faut également fournir des valeurs réalistes du rendement visé, du besoin N/tonne et du coefficient d'utilisation d'azote.

Tableau 38. Doses optimales d'azote déterminées par la méthode du bilan prévisionnel selon les prélèvements relatifs (PR) en pommes de terre et la teneur en N-NO₃ des sols à la plantation.

PR %	Dose optimale N kg/ha	N-NO ₃ plantation mg/kg
30	233	2,4
35	216	4,3
40	200	6,3
45	183	8,3
50	167	10,2
55	150	12,2
60	133	14,1
65	117	16,1
70	100	18,1
75	83	20,0
80	67	22,0
85	50	23,9
90	33	25,9
95	17	27,9
100	0	29,8

Conclusions

Les résultats de cette étude démontrent que les cultures de rotation ont un impact majeur sur les rendements en pommes de terre par rapport à une monoculture. À titre d'exemple, lorsqu'on ajoute de l'orge dans la rotation, l'augmentation du rendement total atteint 9,4 t/ha/année en moyenne par rapport à une monoculture. Les données indiquent également que la dose optimale d'azote varie considérablement selon les systèmes de rotation et la fertilité azotée des sols. Elle pouvait passer de 109 kg/ha à 197 kg/ha en fonction du précédent, et ce pour un même rendement optimal. Les plus faibles niveaux de fertilisation azotée pour atteindre le rendement optimal ont été particulièrement observés lorsqu'un engrais vert avait été introduit dans la rotation. À ce chapitre, le trèfle a été le plus constant avec des quantités d'azote prélevées variant de 49,5 à 87,9 kg N/ha. Par contre, c'est la moutarde blanche qui a donné la quantité la plus élevée avec 92 kg N/ha en 2002 mais moindre les autres années.

Suite à ces résultats, il nous est apparu important de développer une approche qui permettrait d'apporter des ajustements à la fertilisation azotée de la pomme de terre avant la plantation. Des indicateurs comme la teneur des sols en nitrates à la plantation et au buttage, de même que le statut nutritionnel en N de la plante en cours de culture, ont été étudiés. Afin de proposer des balises en relation avec la fertilisation azotée, les fonctions de production de l'azote sur le rendement en pommes de terre ont été déterminées pour l'ensemble des systèmes de rotation. Une dose économique optimale a été précisée de même que les rendements relatifs et les prélèvements relatifs. L'ensemble de ces éléments ont été mis en relation avec la teneur en nitrates des sols au moment de la plantation et au buttage. Cette approche a permis de produire une grille de fertilisation azotée de la pomme de terre qui propose un niveau de fertilisation en fonction du contenu en nitrates des sols. De plus, nous avons déterminé des niveaux de nitrates des pétioles et des indices de chlorophylle des feuilles à maintenir au moment de la pleine floraison afin d'atteindre le rendement optimal. Ces niveaux vont de 900 à 1250 ppm pour le N-NO₃ et la lecture du chlorophyllemètre devrait se situer entre 37,9 et 39,6.

Toujours dans le but de mieux baliser la fertilisation azotée de la pomme de terre, une seconde approche a aussi été étudiée. L'établissement du bilan prévisionnel en azote est apparu comme un outil intéressant et simple à appliquer. Pour ce faire, nous avons mis en relation les prélèvements relatifs et les teneurs en nitrates des sols à la plantation pour déterminer la dose optimale d'azote au moment de la mise en terre de la pomme de terre. Pour réaliser un tel bilan, il faut connaître certains paramètres dont l'objectif de rendement, le prélèvement en N/tonne de tubercules et le coefficient d'utilisation de l'azote des engrais.

À partir de nos travaux, nous avons calculé que le prélèvement total en kg N/t de tubercules en incluant les fanes était de l'ordre de 4,5 kg. Les coefficients moyens d'utilisation de l'azote (CUN) des engrais azotés par la pomme de terre, toutes rotations et années confondues, vont de 64,6 % pour la plus faible dose de N à 43,2 % pour la dose 180 kg N/ha. Il existe aussi des différences importantes entre les rotations. La monoculture de pommes de terre a montré le plus faible CUN moyen suivi par le précédent incorporant le trèfle rouge. Nous en avons conclu que la monoculture utilise moins bien l'azote. Aussi, lorsque le sol fournit beaucoup d'azote, celui des engrais est utilisé moins efficacement et le CUN diminue. Dans ces conditions, les reliquats dans le sol risquent de s'accroître. Ce coefficient décroît donc avec l'augmentation des doses d'azote qui sont apportées. Pour la réalisation du bilan prévisionnel N, nous avons retenu un CUN de 50 % et un prélèvement de 4,5 kg N/t.

Remerciements

Nous tenons à remercier le personnel du Centre de recherche de Deschambault pour le support apporté dans la réalisation de ce projet, de même que le personnel technique du laboratoire d'analyse de l'IRDA et l'équipe responsable de l'édition de ce document.

Références bibliographiques

- Angers, D.A. et M. Giroux. 1996. Recently deposited organic mater in soil water stable aggregates. *Soil Sci. Am. J.* 60: 1547-1551.
- Bélangier, G., J.R. Walsh, J.E. Richards, P.H. Milburn et N. Ziadi. 2000. Yield response to Supplemental irrigation and N fertilization in New-Brunswick. *Amer. J of Potato Res.* 77: 11-21.
- Bélangier, G., J.R. Walsh, J.E. Richards, P.H. Milburn et N. Ziadi. 2001. Predicting nitrogen fertilizer requirements of potatoes in Atlantic Canada with soil nitrate determinations. *Can. J. Soil Sci.* 81: 535-544.
- Berry, D. et J.P. Thicoipe. 1993. Le test d'azote : un outil fiable pour le pilotage de la fertilisation azotée en cultures légumières. *Acta Horticulture* 354 : 125-132.
- Bullock, D.G. 1992. Crop rotation. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 11(4) : 309-326.
- Centre de conservation des sols et de l'eau de l'est du Canada. 1993. Systèmes de rotation des cultures dans la production de la pomme de terre au Canada Atlantique. 33 p.
- Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ). 2001. Guide de référence en fertilisation, 1^{ère} ed. 294 p.
- Comité de la pomme de terre de l'Atlantique. Guide de la pomme de terre du Canada Atlantique. Agdex 257/13. Publication 1300/87.
- Conseil des productions végétales du Québec (CPVQ). 1992. Pomme de terre, culture. Agdex 161/20 CPVQ inc., Québec, Canada.
- Conseil des productions végétales du Québec (CPVQ). 1996. Grille de référence en fertilisation Agdex 540 CPVQ inc., Québec, Canada.
- Easton, G.-D., M.E. Nagle et M.D. Seymour. 1992. Potato production and incidence of *Verticillium Dahliae* following rotation to nonhost crops and soil fumigation in the state of Washington. *American Potato Journal* 69 : 489-502.
- Gasser, M.O., A. N'Dayegamiye et 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. *Canadian Journal of soil science* 75 : 385-390.
- Giroux, M. 1982. Effet des doses, des sources et du mode d'apport de l'azote sur le rendement et la maturité de la pomme de terre cultivée sur différents types de sols du Québec. *Canadian Journal of Soil Science* 62 : 503-517.
- Giroux, M., R. Morin et M. Lemieux. 2000. Effet des doses d'engrais N, P et K sur les rendements, les prélèvements en éléments nutritifs et la teneur en huile du canola. *Agrosol* 11 (1) : 4-14.
- Giroux, M. et M. Lemieux. 2006. Comparaison de différentes méthodes d'évaluation de la fertilité azotée des sols et détermination de la dose optimale N du maïs ensilage. *Agrosolution* 17 (1) : 39-50.

- Glynn, M.D. 1965. Crop sequence in relation to soil-borne pathogens. An international symposium on factors determining the behavior of plant pathogens in soil held at the University of California, Berkeley, April 7-13, 1963. 423-435.
- Griffin, T.S. et O.B. Hesterman. 1991. Potato response to legume and fertilizer nitrogen sources. *Agronomy Journal* 83 : 1004-1012.
- Harris, P.M. 1982. The potato crop the scientific basis for improvement. Department of Agriculture and Horticulture. Reading University. 730 p.
- Hochmuth, G. 1994. Plant petiole sap-testing for vegetable crops. University of Florida. Cooperative Extension Service. Circular 1144. 8 p.
- Honeycutt, C.W., W.M. Clapham et S.S. Leach. 1995. Influence of crop rotation on selected chemical and physical soil properties in potato cropping systems. *American Potato Journal* 72 : 721-735.
- 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. *American Potato Journal* 73 : 45-61.
- Inventaire des problèmes de dégradation des sols agricoles du Québec, Entente auxiliaire Canada-Québec sur le développement agro-alimentaire. 1990, 72 p.
- Isaac, R. A. et W. C. Johnson. 1980. Determination of total nitrogen in plant tissues using BD-40 digestion. *J. Assoc. Off. Anal. Chem.* 50: 98-100.
- Karlen, D.L., G.E. Varvel, D.G. Bullock and R.M. Cruse. 1994. Crop rotation for the 21st Century. *Advances in Agronomy*, vol. 53 : 1-45.
- Le portrait agroenvironnemental des fermes du Québec. 1999. Rapport sectoriel pomme de terre. BPR-GREPA. 117 p.
- Li, H., L.E. Parent, C. Tremblay and A. Karam. 1999. Potato response to crop sequence and nitrogen fertilization following sod breakup in a gleyed humo-ferric podzol. *Canadian Journal of Plant Science* 79 : 439-446.
- McDole, R. E. et C. E. Dallimore. 1978. Continuation of cropping sequence studies on coarse textured soils in southeastern Idaho. *American Potato Journal* 55 : 221-226.
- O'Sullivan, J. 1978. Effects of rotation and nitrogen on yield and quality of potatoes. *Canadian Journal of Plant Science* 58 : 475-483.
- Painchaud, J. 1997. La gestion de l'azote dans la pomme de terre. Compte rendu du colloque sur la pomme de terre : « Cultiver la précision » CPVQ : 43-54.
- Porter, G. A. et J. A. Sisson. 1991. Response of Russet Burbank and Shepody potatoes to nitrogen fertilizer in two cropping systems. *American Potato Journal* 68 : 425-443.
- SAS Institute, Inc. 1985. SAS user's guide. Statistics, version 5, ed. SAS Institute Inc., Cary, NC. 986 p.
- Soltner, D. 1995. Les grandes productions végétales 18^{ième} édition. Collection sciences et techniques agricoles. 471 p.
- Syndicat des producteurs de pommes de terre de la région de Québec. 1994. Pomme de terre, pour une gestion optimale des ressources. 50 p.
- Tran, T. Sen et M. Giroux. 1991. Fertilisation azotée (15N) de la pomme de terre de primeur (*Solanum tuberosum L.*) selon les dates de récolte. *Agrosol* 4 : 20-29.

Tran, T. Sen et M. Giroux. 1998. Étude du bilan de l'engrais azoté (15N) pour le maïs cultivé dans différents types de sol. *Agrosol* 10 : 50-63.

Tremblay, N., H.-C. Scharpf, U. Weier, H. Laurence et J. Owen. 2001. Régie de l'azote chez les cultures maraîchères. *Agriculture et Agroalimentaire Canada*. 70 p.

Tremblay, N. et C. Bélec. 2006. L'indice de saturation en chlorophylle : un moyen d'ajuster les applications d'azote au maïs selon les caractéristiques de la saison. *Bulletin AQSSS*. 16 (1) : 45.

Vereijken, P. et C.D. Van Loon. 1991. A strategy for integrated low-input potato production. *Potato Research* 34 : 57-66.

Vitosh, M. et G. Silva. 1996. Potato petiole sampling procedure for sap nitrate testing. Michigan State University Extension. <http://www.msue.msu.edu/msue/imp/modec4/06129605.html>

Waterer, D. 1997. Petiole sap $\text{NO}_3\text{-N}$ testing as a method for monitoring nitrogen nutrition of potato crops. *Can. J. Plant Sci.* 77: 273-278.

Westra, J. V., K. J. Boyle et G. A. Porter. 1995. Net revenues of potatoes rotated with other crops. *American Potato Journal* 72 : 99-117.

