

JEAN PIERRE MVONDO AWONO

**FERTILISATION AZOTÉE DU MAÏS-GRAIN (*Zea mays* L.) EN
ROTATION AVEC UNE LUZERNE NON DORMANTE
(*Medicago sativa* L. var. Nitro)**

**Thèse
présentée
à la Faculté des études supérieures
de l'Université Laval
pour
l'obtention
du grade de Philosophiae Doctor (Ph.D.)**

Département de Phytologie

**FACULTÉ DES SCIENCES DE L'AGRICULTURE ET DE L'ALIMENTATION
UNIVERSITÉ LAVAL
QUÉBEC**

Mai 1997

© Jean Pierre MVONDO AWONO



**National Library
of Canada**

**Bibliothèque nationale
du Canada**

**Acquisitions and
Bibliographic Services**

**Acquisitions et
services bibliographiques**

**395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada**

**395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada**

Your file Votre référence

Our file Notre référence

The author has granted a non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of this thesis in microform, paper or electronic formats.

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de cette thèse sous la forme de microfiche/film, de reproduction sur papier ou sur format électronique.

The author retains ownership of the copyright in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

0-612-25253-1

Canada

Ce 22^e jour du mois de mai 19 97, les personnes soussignées, leur qualité de membres du jury de la thèse de monsieur Jean-Pierre MVONDO AWONO ont assisté à la soutenance de cette thèse.

<u>NOMS</u>	<u>UNIVERSITÉ</u>	<u>SIGNATURE</u>
<u>Mme Thi Sen TRAN</u>	<u>Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Agro- Alimentaire du Québec</u>	
<u>M. Ghislain GENDRON</u>	<u>Université Laval</u>	
<u>M. Guy ALLARD</u>	<u>Université Laval</u>	
<u>M. Régis R. SIMARD</u>	<u>Université Laval</u>	
<u>M. François-P. CHALIFOUR</u>	<u>Université Laval</u>	

M. Gilles BRETON, vice-doyen, Fac. des études

SIGNATURE DU PRÉSIDENT DE LA SOUTENANCE

Dédicace

Avec amour, reconnaissance et respect, je dédie cette thèse à :

- mon épouse :

Ambono Edith Pascaline

- mes enfants :

Mvondo Ambono Didier Bertrand

Mvondo Éléme Mireille Angeline

Mvondo Awana Franck Hervé

Nkoussa Mvondo Estelle Valérie

Essah Mvondo Julien Patrick

- mes parents :

Essah Julienne

Awana René

Puisse ce travail leur apporter un motif de satisfaction pour tant de sacrifices !

RÉSUMÉ COURT

Des successions culturales comportant des monocultures d'hybrides de maïs et une luzerne annuelle en tête de rotation à ces hybrides ont été étudiées sur un loam sableux et sur un sol argileux dans l'Est du Québec de 1992 à 1994. L'objectif était de déterminer l'impact d'une année de luzerne sur le rendement et les besoins en N du maïs-grain subséquent ainsi que sur les teneurs en nitrates du sol. Le maïs-grain monoculture ou en rotation a reçu 10, 60, 120 ou 180 kg N ha⁻¹ sous forme de NH₄NO₃. Pendant l'année d'implantation (1992), environ 60 % de l'N du fourrage de la luzerne provenait de la fixation symbiotique d'N₂ atmosphérique. Les rendements de maïs ont augmenté avec la dose d'N appliquée. L'année suivante (1993), le précédent d'une année de luzerne a favorisé des rendements plus élevés que le précédent de maïs et l'impact de la luzerne était plus marqué aux faibles doses d'N. Des différences entre hybrides ont été observées. Les hybrides les mieux adaptés ont eu des rendements, des efficacités d'utilisation de l'N et des indices de récolte plus élevés. La luzerne en tête de rotation a diminué les proportions et les quantités d'N dérivées du fertilisant azoté par une augmentation des proportions et des quantités d'N dérivées des résidus de luzerne ou d'N conservé dans le sol. La luzerne a favorisé une augmentation des teneurs du sol en N minéral à la fin de la saison de croissance de 1992 et en début de celle de 1993. Ces effets d'un précédent d'une année de luzerne se sont estompés en 1994. Toutefois, l'inclusion d'une luzerne en rotation avec le maïs est une alternative intéressante dans les régions à courte saison de croissance où le maïs-grain est produit.

F.-P. CHALIFOUR
Directeur de la thèse

R.-R. SIMARD
Co-Directeur de la thèse

J.-P. MVONDO AWONO
Candidat au doctorat

RÉSUMÉ LONG

La superficie emblavée en maïs-grain (*Zea mays* L.) a connu une grande expansion au Québec au cours des deux dernières décennies, ceci principalement dans les régions accumulant moins de 2500 unités thermiques maïs (UTM). Cette culture est très exigeante en azote (N). Entre autres, la surfertilisation azotée de cette culture contribue à la contamination des eaux de surface et des nappes phréatiques par les nitrates. De plus, la monoculture de maïs a été identifiée comme l'une des principales causes de dégradation de la structure et d'acidification des sols agricoles au Québec. L'utilisation de la luzerne (*Medicago sativa* L.) en rotation avec le maïs permettrait de limiter les problèmes de dégradation des sols liés à la monoculture de maïs et de diminuer les quantités d'N minéral nécessaires au maïs subséquent.

Ainsi, l'impact d'une année de luzerne non dormante (var. Nitro) sur l'azote minéral du sol, le rendement et la nutrition azotée de trois hybrides de maïs précoces recevant 10, 60, 120 ou 180 kg N ha⁻¹ a été étudié de 1992 à 1994 à deux sites, soit Saint-Anselme sur un loam sableux de la série Rivière-du-Loup et Saint-Nicolas sur sol argileux de la série Kamouraska dans l'Est du Québec. Les hybrides de maïs étaient Northrup King 0565, Pioneer 3979 et Pioneer 3962. Leurs besoins respectifs en UTM étaient 2300, 2325 et 2500.

La réponse à l'N a varié en fonction de l'hybride et de la culture utilisée en tête de rotation. La contribution du précédent de luzerne au rendement a été plus importante lorsque la dose d'N appliquée était plus faible. L'augmentation de rendement due au précédent de luzerne Nitro a varié de 15 à 37 % en 1993 et de 4 à 6 % en 1994. Les doses optimales d'N pour la production du grain ont varié de 0 à 122 kg ha⁻¹ lorsque la culture en tête de rotation était la luzerne et de 83 à 115 kg ha⁻¹ pour le maïs en

monoculture. Sur la base des rendements en grain, les valeurs de remplacement en fertilisant azoté (VRFA) de la luzerne Nitro ont varié de 78 à 106 kg N ha⁻¹ en 1993 et 3 à 14 kg N ha⁻¹ en 1994 sur loam sableux et de 28 à 59 kg N ha⁻¹ en 1993 et 0 à 7 kg N ha⁻¹ en 1994 sur sol argileux. Les VRFA étaient plus élevées pour les hybrides Pioneer 3979 et Northrup King 0565.

Le prélèvement d'N et les teneurs en N des tissus étaient plus élevés après la luzerne. Les efficacités de rendement, de récupération et physiologique de l'N appliqué sur les bases incrémentales et cumulatives n'ont pas été affectées de la même manière et ont parfois varié selon l'hybride. Les valeurs obtenues ont été plus faibles aux doses élevées d'N et lorsque le précédent cultural fut la luzerne. L'efficacité de rendement du maïs en 1993 était de 26 à 53 % inférieure après un précédent de luzerne par rapport à la monoculture de maïs à la dose de 180 kg N ha⁻¹.

Environ 60 % de l'azote du fourrage de la luzerne provenait de la fixation symbiotique d'N₂ atmosphérique. Les pourcentages et les quantités d'N provenant du fertilisant azoté ont augmenté avec la dose d'N de 3 à 63 % soit 3 à 89 kg N ha⁻¹, respectivement. Toutefois, les valeurs observées ont varié en fonction des sites, des hybrides et des successions culturales. L'efficacité d'utilisation du fertilisant azoté a été plus élevée à la dose de 120 kg N ha⁻¹. Les effets de rotation dus à l'N provenant de la luzerne ont été plus marqués en 1993 qu'en 1994. Ils se sont traduits par une efficacité d'utilisation de l'azote de l'engrais moins élevée, des pourcentages et des quantités d'N dérivées du fertilisant azoté plus faibles qu'en monoculture de maïs.

Les différences observées entre hybrides de maïs pour l'efficacité d'utilisation de l'N ont reflété leur adaptation à l'environnement. Les indices de récolte pour le rendement, l'N disponible, l'N dérivé du fertilisant azoté et pour l'N issu des résidus de luzerne ou de l'N conservé dans le sol ont surtout été affectés par les différences entre hybrides. La partition de la matière sèche et de l'N a été effectuée en faveur du grain par rapport aux

cannes chez les hybrides les mieux adaptés (Northrup King 0565 et Pioneer 3979). Les indices de récolte étaient plus élevés pour ces derniers par rapport à l'hybride moins adapté Pioneer 3962.

L'enfouissement des racines et des collets de luzerne (en automne 1992) a eu pour effet d'augmenter les quantités de nitrates dans les profils culturaux au printemps suivant (1993). Les différences ont été plus importantes à la sortie de l'hiver et dans la couche de 0 à 30 cm. Dans cette couche sur le loam sableux, les parcelles ayant un précédent de luzerne fertilisées avec 10 kg N ha^{-1} ($L_{10} - M_{10}$) ont présenté des teneurs en N-NO₃ d'environ 138 kg ha^{-1} alors que celles fertilisées avec 180 kg N ha^{-1} ($M_{180} - M_{180}$) avec précédent de maïs avaient une teneur moyenne de $86 \text{ kg N-NO}_3 \text{ ha}^{-1}$. Sur le sol argileux on a observé $148 \text{ kg N-NO}_3 \text{ ha}^{-1}$ dans les parcelles $L_{10} - M_{10}$ et $71 \text{ kg N-NO}_3 \text{ ha}^{-1}$ dans les parcelles $M_{180} - M_{180}$.

Les différences entre successions culturales sont devenues moins marquées pendant les échantillonnages subséquents. En 1994, l'effet du précédent de luzerne s'était estompé et la fertilisation azotée a eu un effet linéaire significatif sur la concentration des nitrates du sol. Aucune accumulation d'N en fin de saison dans les couches étudiées n'a été observée, quelle que soit la dose d'N appliquée ou le précédent culturel étudié, suggérant alors des pertes d'N importantes dans les parcelles recevant les doses élevées d'N et celles ayant en plus, un précédent de luzerne.

En conclusion, l'inclusion d'une année de luzerne en tête de rotation a eu pour effet d'augmenter significativement les teneurs en N du sol, de contribuer à la nutrition azotée et d'augmenter le rendement du maïs-grain subséquent. Toutefois, cet impact du précédent de luzerne dépend du niveau de fertilisation azotée, des hybrides de maïs cultivés et du type de sol.

F.-P CHALIFOUR
Directeur de la Thèse

Y.-R. SIMARD
Co-Directeur de la thèse

J.-P. MVONDO AWONO
Candidat au doctorat

Avant-Propos

Les rotations culturales incluant des légumineuses sont connues, utilisées et étudiées depuis plusieurs siècles. L'impact des légumineuses dans les systèmes de culture est cependant très diversifié, ce qui rend très délicat toute tentative de généralisation des résultats obtenus d'un site à un autre. Par ailleurs, l'insuffisance des connaissances sur les facteurs, les processus et les mécanismes responsables de la performance accrue des plantes dans les rotations a souvent constitué un obstacle majeur à leur adoption. Entre autres, l'apport d'azote par les légumineuses est l'un des facteurs positifs souvent évoqués. La quantification et la compréhension de l'impact des légumineuses dans les rotations culturales est nécessaire aussi bien pour des raisons agronomiques que pour des considérations environnementales, écologiques et économiques.

Cette étude est importante dans le contexte de l'agriculture moderne contemporaine. En effet, la fertilisation azotée sur laquelle repose en grande partie les hauts rendements des cultures entraîne deux préoccupations majeures : la fourniture d'azote aux cultures et la limitation des pertes environnementales d'N. Cette étude pourrait aussi être utile dans le cadre de l'agriculture à faibles intrants, en particulier là où les engrais azotés ne sont peu disponibles aux producteurs. Dans un cas comme dans l'autre, l'inclusion de légumineuses dans les rotations serait une alternative intéressante pour la fourniture d'azote à la culture subséquente.

La présente thèse est présentée en cinq chapitres. Le premier chapitre est une revue de la littérature. Les chapitres II, III, IV et V présentent les résultats; ils sont rédigés en anglais afin de faciliter leur diffusion ultérieure sous forme d'articles scientifiques. Toutefois, un résumé en français précède chacun d'eux. Les références citées dans l'introduction générale ainsi que dans la revue de littérature renvoient le lecteur à la bibliographie présentée après la conclusion générale. Les documents cités dans les chapitres en anglais se retrouvent en référence à la fin de ceux-ci.

REMERCIEMENTS

Il ne m'est pas possible de mentionner ici toute l'aide dont j'ai pu bénéficier tout au long de mes études ou encore, tous mes généreux bienfaiteurs. Ainsi, que tous ceux qui, près ou de loin, nommés ou non, ont contribué à faciliter la réalisation de cette thèse trouvent ici, l'expression de ma profonde gratitude. J'aimerais cependant remercier très particulièrement :

- mon épouse Ambono Edith Pascaline qui m'a incité à revenir aux études; elle m'accompagné avec amour et encouragements pendant tout mon cheminement;**
- le Programme canadien de bourses de la francophonie qui m'a offert l'opportunité de continuer mes études et l'Université de Dschang au Cameroun pour m'avoir libéré de mes fonctions de Chargé de cours pendant la durée de mes études;**
- les familles Awana et Eloundou pour avoir accepté d'élever nos enfants pendant notre séjour au Canada;**
- mes enfants restés au Cameroun : Mvondo Éléme Mireille Angeline, Mvondo Awana Franck Hervé, Nkoussa Mvondo Estelle Valérie et Essah Mvondo Julien Patrick pour leurs encouragements, leur attitude et leur tenue extraordinaires pendant mon absence;**
- le Professeur François -P. Chalifour et le Chercheur Régis R. Simard, Directeur et Co-Directeur de thèse pour leur encadrement et les efforts déployés pour m'aider tout au long de mon cheminement; leurs conseils, leur disponibilité et leur rigueur d'appréciation m'ont permis d'éviter de nombreux égarements et de progresser avec beaucoup de satisfaction; leur générosité m'a permis d'honorer des engagements importants;**

- le Département de phytologie de l'Université Laval et la Station de recherche d'Agriculture et Agro-alimentaire Canada de Sainte-Foy pour toute l'infrastructure qui m'était accessible pendant mes études;
- le Professeur Daniel Dostaler, Directeur du programme de biologie végétale au Département de phytologie et les Chercheurs Denis Angers (Agriculture et Agro-alimentaire Canada) et Adrien N'Dayegamiye (Ministère de l'agriculture, des pêcheries et de l'alimentation du Québec) pour leurs conseils et leur aide;
- le Professeur Guy Allard du Département de phytologie, pour le détail avec lequel il a effectué la prélecture de ma thèse; ses remarques et ses suggestions m'ont permis d'améliorer la présentation et la qualité de cette thèse;
- les étudiants d'été et les techniciens dont Josée Bourassa, Sylvie Côté, Maurice Deschênes, Jean Goulet, Patrice Jolicoeur, Jean Martin, Sylvie Michaud pour leur contribution à divers travaux de parcelles et de laboratoire;
- tous mes camarades de laboratoire dont Suzanne Beauchemin, Régis Baziramakenga, Marie Josée Garand, Isabelle Royer et Noura Ziadi pour leur précieuse collaboration;
- messieurs Da Sylva Arthur et Mathieu Ngouajio pour leur précieuse amitié et enfin,
- mes parents, mes frères, mes soeurs et mes amis pour leurs encouragements.

TABLE DES MATIÈRES

Dédicace	i
Résumé court	ii
Résumé long	iii
Avant-propos	vi
Remerciements	vii
Table des matières	ix
Liste des tableaux	xiii
Liste des figures	xx

Introduction générale	1
------------------------------	----------

Chapitre I

Revue de la littérature

1. Les principales sources d'azote dans les agro-écosystèmes	7
1.1. Les engrais minéraux azotés	7
1.2. Les fumures organiques	8
1.3. La minéralisation des résidus de culture et de la matière organique du sol	9
1.4. Les légumineuses	10
2. Les mécanismes de perte d'azote du sol	11
2.1. Le lessivage	11
2.2. L'érosion	12
2.3. Les pertes gazeuses	13

3. Gestion de la fertilisation azotée et préservation de l'environnement	14
3.1. Devenir des fumures azotées	14
3.2. Pratiques culturales pour réduire la perte des nitrates	15
3.2.1. La collecte et de l'épandage des différents effluents d'élevage	15
3.2.2. L'ajustement des besoins et des apports d'engrais azotés	16
3.2.3. Le fractionnement de la fertilisation azotée	17
3.2.4. L'utilisation d'inhibiteurs de nitrification	17
3.2.5. Les rotations culturales	18
4. Fertilisation azotée du maïs	18
4.1. L'importance de l'azote pour les plantes	18
4.2. L'acquisition de l'azote	19
4.3. Les carences d'azote	20
4.4. L'excès d'azote	21
4.5. Détermination des besoins en azote	22
5. Effets des légumineuses dans les systèmes de culture	23
5.1. Impact des légumineuses sur les cultures compagnes	23
5.2. Impact des légumineuses sur les cultures subséquentes	23
5.3. L'enrichissement du sol en azote	25
5.4. L'utilisation de la luzerne comme plante annuelle	25
5.5. Détermination de l'apport des légumineuses aux cultures subséquentes	26
5.5.1. Fixation d'azote	26
5.5.2. Transfert d'azote aux cultures subséquentes	26
6. Les hypothèses de recherche	28
7. Les objectifs de l'étude	29

Chapitre II

Early maturing corn hybrids response to nitrogen fertilizer in monoculture or after alfalfa

<i>Résumé</i>	32
<i>Abstract</i>	33
Introduction	34
Materials and methods	36
Results	39
Discussion	43
Conclusions	49
References	64

Chapitre III

Nitrogen nutrition of early maturing corn hybrids in monoculture or following alfalfa

<i>Résumé</i>	71
<i>Abstract</i>	72
Introduction	73
Materials and methods	75
Results	78
Discussion	83
Conclusions	86
References	102

Chapitre IV

Nitrogen Sources and use efficiency of short season corn in monoculture or following alfalfa

Résumé	108
Abstract	109
Introduction	110
Materials and methods	112
Results	116
Discussion	122
Conclusion	126
References	142

Chapitre v

Nitrogen fertilization effects on soil nitrate-nitrogen in alfalfa-corn cropping systems

<i>Résumé</i>	148
Abstract	149
Introduction	150
Materials and methods	152
Results	154
Discussion	157
Conclusion	162
References	175
Discussion générale	180
Conclusion générale	191
Bibliographie	195

LISTE DES TABLEAUX

CHAPTER II

Table 2.1.	Selected soil properties at Saint-Anselme and Saint-Nicolas in the 0-30 cm soil layer prior to crop establishment in 1992	50
Table 2.2.	Accumulated precipitations (mm) and corn heat units (CHU) from planting date to harvest in 1992 and from May to October in 1993 and 1994 near Saint-Anselme (Scott-Jonction) and near Saint-Nicolas (Quebec City)	50
Table 2.3.	Summary of the analyses of variance for corn grain % moisture at harvest on the sandy loam soil (at Saint-Anselme) and on the clay soil (at Saint-Nicolas) in 1992, 1993 and 1994	51
Table 2.4.	Summary of the analyses of variance for corn grain yields on the sandy loam soil (at Saint-Anselme) and on the clay soil (at Saint-Nicolas) in 1992, 1993 and 1994	52
Table 2.5.	Summary of the analyses of variance for corn stover yields on the sandy loam soil (at Saint-Anselme) and on the clay soil (at Saint-Nicolas) in 1992, 1993 and 1994	53
Table 2.6.	Regression equations for grain and stover yields (Y) as a function of N rate (N) on the sandy loam soil (at Saint-Anselme and on the clay soil (at Saint-Nicolas) in 1993 and 1994	54

Table 2.7.	Summary of the analyses of variance for corn harvest index on the sandy loam soil (at Saint-Anselme) and on the clay soil (at Saint-Nicolas) in 1992, 1993 and 1994	55
-------------------	--	-----------

CHAPTER III

Table 3.1.	Summary of the analyses of variance for corn tissue N concentrations on the sandy loam soil (at Saint-Anselme) and on the clay soil (at Saint-Nicolas) in 1993 and 1994	88
Table 3.2.	N concentrations (%) of grain and stover of second-year corn hybrids (Northrup King 0565, Pioneer 3979 and Pioneer 3962) grown in monoculture or after first-year alfalfa and receiving N fertilizer on the sandy loam and clay soils in 1994	89
Table 3.3.	Summary of the analyses of variance for corn N uptake on the sandy loam soil (Saint-Anselme) and on the clay soil (at Saint-Nicolas) in 1993 and 1994	90
Table 3.4.	Estimated N fertilizer replacement values (NFRV) in kg ha⁻¹ of one year non dormant alfalfa for corn production on the sandy loam soil (at Saint-Anselme) and on the clay soil (at Saint-Nicolas) in 1993 and 1994	91
Table 3.5.	Summary of the analyses of variance of N use efficiency values for three corn hybrids as affected by N rate and first-year crop on the sandy loam soil (at Saint-Anselme) in 1993	92

Table 3.6.	Nitrogen use efficiency values for three corn hybrids as affected by N rates and previous crop on the sandy loam soil (at Saint-Anselme) in 1993	93
Table 3.7.	Summary of the analyses of variance of N use efficiency values for three corn hybrids as affected by N rate and first-year crop on the sandy loam soil (at Saint-Anselme) 1994	94
Table 3.8.	Nitrogen use efficiency values for three corn hybrids as affected by N rate and previous crop on the sandy loam soil in 1994	95
Table 3.9.	Summary of the analyses of variance for nitrogen harvest index (NHI) on the sandy loam soil (at Saint-Anselme) and on the clay soil (at Saint-Nicolas) 1993 and 1994	96
Table 3.10.	Nitrogen harvest index of three corn hybrids (Northrup King 0565, Pioneer 3979 and Pioneer 3962) grown in monoculture or after first-year alfalfa in 1993 and 1994	97
 CHAPTER IV		
Table 4.1.	Summary of the analyses of variance for forage yield, N concentration (%) and uptake, and proportions and amounts of N₂ fixed by alfalfa on the sandy loam soil (at Saint-Anselme) in 1992	128
Table 4.2.	Summary of the analyses of variance for forage yield, N concentration (%) and uptake, and proportions and amounts of N₂ fixed by alfalfa on the clay soil (at Saint-Nicolas) in 1992	128

Table 4.3.	Forage yield, N concentration (%) and proportions and amounts of N₂ fixed by Nitro alfalfa on the sandy loam soil (at Saint-Anselme in 1992	129
Table 4.4.	Forage yield, N concentration (%) and proportions and amounts of N₂ fixed by Nitro alfalfa on the clay soil (at Saint-Nicolas) in 1992	129
Table 4.5.	Percent ¹⁴N atom excess in three corn hybrids grain and stover on the sandy loam soil (at Saint-Anselme) and on the clay soil (at Saint-Nicolas) in 1993 and in 1994	130
Table 4.6.	Summary of the analyses of variance for grain and stover proportions (%) and amounts of N derived from fertilizer (Ndff) and N use efficiency (NUE) on the sandy loam soil (at Saint-Anselme) in 1993	131
Table 4.7.	Summary of the analyses of variance for grain and stover proportions (%) and amounts of N derived from fertilizer (Ndff) and N use efficiency (NUE) on the clay soil (at Saint-Nicolas) in 1993	132
Table 4.8.	Summary of the analyses of variance for grain and stover proportions (%) and amounts of N derived from fertilizer (Ndff) and N use efficiency (NUE) on the sandy loam soil at Saint-Anselme in 1994	133
Table 4.9.	Summary of the analyses of variance for grain and stover proportions (%) and amounts of N derived from fertilizer (Ndff) and N use efficiency (NUE) on the clay soil at Saint-Nicolas in 1994	134

Table 4.10.	Percent of N derived from fertilizer in three corn hybrids grain and stover on the sandy loam soil (at Saint-Anselme) and on the clay soil (at Saint-Nicolas) in 1993 and 1994	135
Table 4.11.	Amounts of N derived from fertilizer in three corn hybrids grain and stover on the sandy loam soil (at Saint-Anselme) and on the clay soil (at Saint-Nicolas) in 1993 and 1994	136
Table 4.12.	Nitrogen use efficiency (NUE) of three corn hybrids (Northrup King 0565, Pioneer 3979 and Pioneer 3962) grain and stover on the sandy loam soil (at Saint-Anselme) and on the clay soil (at Saint-Nicolas) in 1993 and 1994	137
Table 4.13.	Summary of the analyses of variance for grain and stover proportions and amounts of N derived from alfalfa residues and from conserved soil N (Ndfrc) on the sandy loam soil (at saint-Anselme) and on the clay soil (at Saint-Nicolas) in 1993	138
Table 4.14.	Percentages and amounts of N derived from alfalfa residues and from conserved soil N for grain and stover of three corn hybrids (Northrup King 0565, Pioneer 3979 and Pioneer 3962) grain and stover on the sandy loam soil (at Saint-Anselme) and on the clay soil (at Saint-Nicolas) in 1993	139
Table 4.15.	Summary of the analyses of variance for N harvest index of N derived from fertilizer (NHI_{Ndf}) on the sandy loam soil (at Saint-Anselme) and on the clay soil (at Saint-Nicolas) in 1993 and 1994	140

Table 4.16.	Mean nitrogen harvest index for N derived from fertilizer (NHI_{Ndf}) on the sandy loam soil (at Saint-Anselme) and on the clay soil (at Saint-Nicolas) in 1993 and 1994	140
Table 4.17.	Summary of the analyses of variance for harvest index of N derived from alfalfa residues or soil conserved harvest index (NHI_{Ndfrc}) on sandy loam soil (at Saint-Anselme) and on the clay soil (at Saint-Nicolas) in 1993 and 1994	141
Table 4.18.	Mean nitrogen harvest index for N derived from alfalfa residues or soil conserved harvest index (NHI_{Ndfrc}) on sandy loam soil (at Saint-Anselme) and on the clay soil (at Saint-Nicolas) in 1993 in 1993	141
 CHAPTER V		
Table 5.1.	Summary of the analyses of variance of soil NO_3^- concentrations on the sandy loam soil (at Saint-Anselme) and on the clay soil (at Saint-Nicolas) in 1992	163
Table 5.2.	Mean NO_3^- concentrations on the sandy loam soil (at Saint-Anselme) at two sampling dates under three corn hybrids : Northrup King 0565 (NK0565), Pioneer 3979 (P3979) and Pioneer 3962 (P3962) at three soil layers (0-30, 30-60 and 60-90 cm) in 1992	164
Table 5.3.	Summary of the analyses of variance of soil NO_3^- concentrations at four sampling dates on the sandy loam soil (at Saint-Anselme) and on the clay soil (at Saint-Nicolas) in 1993	165

- Table 5.4. Summary of the analyses of variance of soil NO₃⁻ concentrations in the 0-30 cm soil layer in 1993 on the sandy loam soil (at Saint-Anselme) and on the clay soil (at Saint-Nicolas) in 1993 166**
- Table 5.5. Summary of the analyses of variance of soil NO₃⁻ concentrations at four sampling dates on the sandy loam soil (at Saint-Anselme) and on the clay soil (at Saint-Nicolas) in 1994 167**
- Table 5.6. Summary of the analyses of variance of soil NO₃⁻ concentrations in the 0-30 cm soil layer in 1994 on the sandy loam soil (at Saint-Anselme) and on the clay soil (at Saint-Nicolas) in 1994 168**

LISTE DES FIGURES

CHAPTER II

- Figure 2.1. Grain % moisture at harvest on on the sandy loam soil (at Saint-Anselme) and on the clay soil (at Saint-Nicolas) for three corn hybrids (Northrup King 0565, Pioneer 3979 and Pioneer 3962) in 1992, 1993 and 1994. 56**
- Figure 2.2. First-year (1992) yields (grain and stover) of three corn hybrids (Northrup King 0565, Pioneer 3979 and Pioneer 3962) On the sandy loam soil (at Saint-Anselme) and on the clay soil (at Saint-Nicolas) 57**
- Figure 2.3. Second-year (1993) grain yields of three corn hybrids (Northrup King 0565, Pioneer 3979 and Pioneer 3962) after first-year corn (C-C) or first-year nondormant alfalfa (A-C) on the sandy loam soil (at Saint-Anselme) and on the clay soil (at Saint-Nicolas) 58**
- Figure 2.4. Second-year (1993) stover yields of three corn hybrids (Northrup King 0565, Pioneer 3979 and Pioneer 3962) after first-year corn (C-C) or first-year nondormant alfalfa (A-C) on the sandy loam soil (at Saint-Anselme) and on the clay soil (at Saint-Nicolas) 59**
- Figure 2.5. Third-year (1994) grain yields of three corn hybrids (Northrup King 0565, Pioneer 3979 and Pioneer 3962) after first-year corn (C-C) or first-year nondormant alfalfa (A-C) on the sandy loam soil (at Saint-Anselme) and on the clay soil (at Saint-Nicolas) 60**

- Figure 2.6.** Third-year (1994) stover yields of three corn hybrids (Northrup King 0565, Pioneer 3979 and Pioneer 3962) after first-year corn (C-C) or first-year nondormant alfalfa (A-C) on the sandy loam soil (at Saint-Anselme) and on the clay soil (at Saint-Nicolas) 61
- Figure 2.7.** Harvest index on the sandy loam soil (at Saint-Anselme) and on the clay soil (at Saint-Nicolas) for three corn hybrids (Northrup King 0565, Pioneer 3979 and Pioneer 3962) in 1992 and 1993 62
- Figure 2.8.** Harvest index on the sandy loam soil (at Saint-Anselme) and on the clay soil (at Saint-Nicolas) for three corn hybrids (Northrup King 0565, Pioneer 3979 and Pioneer 3962) grown in monoculture (C-C-C) or in rotation with alfalfa (A-C-C) in 1994 63
- CHAPTER III**
- Figure 3.1.** Grain N uptake of three early corn hybrids (Northrup King 0565, Pioneer 3979 and Pioneer 3962) after first-year corn (C-C) or first-year non-dormant alfalfa (A-C) on the sandy loam soil (at Saint-Anselme) and on the clay soil (at Saint-Nicolas) in 1993 98
- Figure 3.2.** Stover N uptake of three early corn hybrids (Northrup King 0565, Pioneer 3979 and Pioneer 3962) after first-year corn (C-C) or first-year non-dormant alfalfa (A-C) on the sandy loam soil (at Saint-Anselme) and on the clay soil (at Saint-Nicolas) in 1993 99

- Figure 3.3.** Grain N uptake of three early corn hybrids (Northrup King 0565, Pioneer 3979 and Pioneer 3962) in monoculture (C-C-C) or after first-year nondormant alfalfa (A-C-C) on the sandy loam soil (at Saint-Anselme) and on the clay soil (at Saint-Nicolas) in 1994 100
- Figure 3.4.** Stover N uptake of three early corn hybrids (Northrup King 0565, Pioneer 3979 and Pioneer 3962) in monoculture (C-C-C) or after first-year nondormant alfalfa (A-C-C) on the sandy loam soil (at Saint-Anselme) and on the clay soil (at Saint-Nicolas) in 1993 101

CHAPTER V

- Figure 5.1.** Residual soil NO₃⁻ concentrations on the sandy loam soil (at Saint-Anselme) and on the clay soil (at Saint-Nicolas) in three soil layers after alfalfa fertilized with 10 kg N ha⁻¹ (A10N) and corn fertilized with 10 or 180 kg N ha⁻¹ (C10N or C180N) on October 30 1992 169
- Figure 5.2.** Soil NO₃⁻ concentrations in three soil layers at two N rates (10 or 180 kg N ha⁻¹) on the sandy loam soil (at Saint-Anselme) and on the clay soil (at Saint-Nicolas) for cropping systems at early spring and at the end of the growing season in 1993; corn was preceded by either alfalfa (A10N-C10N) or corn (C10N-C10N or C180N-C180N) 170
- Figure 5.3.** Variations of soil NO₃⁻ concentrations in the 0-30 cm soil layer in 1993 on the sandy loam soil (at Saint-Anselme) and on the clay soil (at Saint-Nicolas) at four sampling dates for corn after alfalfa fertilized with 10 kg N ha⁻¹ (A10N-C10N) and continuous corn fertilized with 10 or 180 kg N ha⁻¹ (C10N-C10N or C180N-C180N) 171

- Figure 5.4.** Soil NO₃⁻ concentrations at three depths and two N rates (10 or 180 kg N ha⁻¹) on the sandy loam soil (at Saint-Anselme) for crop successions at early spring and at the end of the growing season in 1994; corn was preceded by either alfalfa (A10N-C10N-10N or A180N-C180N-180N) or corn (C10N-C10N-C10N or C180N-C180N-C180) 172
- Figure 5.5.** Soil nitrate concentrations at three depths and two N rates (10 or 180 kg N ha⁻¹) on the clay soil (at Saint-Nicolas) for crop successions at early spring and at the end of the growing season in 1994; corn was preceded by either alfalfa (A10N-C10N-10N or A180N-C180N-180N) or corn (C10N-C10N-C10N or C180N-C180N-C180) 173
- Figure 5.6.** Variations of soil nitrate concentrations in the 0-30 cm soil layer in 1994 on the sandy loam soil (at Saint-Anselme) and on the clay soil (at Saint-Nicolas) at four sampling dates for corn after alfalfa fertilized with 10 or 180 kg N ha⁻¹ (A10N-C10N-10N or A180N-C180N-180N) and continuous corn fertilized with 10 or 180 kg N ha⁻¹ (C10N-C10N-C10N or C180N-C180N-C180) 174

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le maïs (*Zea mays* L.) est la céréale la plus cultivée dans le monde après le blé (*Triticum aestivum* L.) et le riz (*Oryza sativa* L.) (FAO, 1991). La grande capacité d'adaptation du maïs permet sa production dans des conditions climatiques et édaphiques très variées, depuis le 60° de latitude Nord en Norvège jusqu'au 42° de latitude Sud en Nouvelle Zélande; et du niveau de la mer jusqu'à 4 000 m d'altitude dans les Andes et au Mexique (Gamboa, 1978; Fageria et al., 1991). L'expansion de la culture du maïs dans les régions septentrionales à climat froid est en partie due à l'amélioration génétique de cette espèce et notamment, à la création d'hybrides hâtifs. Toutefois, la zone de prédilection du maïs est la région tropicale d'où il est originaire.

Outre les limitations d'ordre climatique, le maïs nécessite des quantités importantes d'azote (N) pour l'obtention de bons rendements. A travers le monde, de nombreux producteurs ont alors privilégié l'application de doses massives d'N, préférant des pertes d'N plutôt que de rendement (Bedekovick, 1987). Les fertilisants azotés sont coûteux et ils méritent d'être mieux gérés. L'N apporté en excès est une perte économique pour les producteurs et un danger pour l'environnement. La pollution potentielle associée à l'usage excessif des engrais azotés et l'utilisation abondante de l'énergie fossile pour leur fabrication sont aux antipodes des principes de l'agriculture durable et de la conservation de l'environnement.

L'N résiduel sous forme de nitrates peut être lessivé puis, contaminer les cours d'eau et les nappes phréatiques (Bedekovick, 1987). Les nitrates sont nocifs pour la santé humaine et animale lorsque leur concentration dans les eaux potables excède 10 mg N L⁻¹ (Bockman et al., 1990). Les nitrates peuvent aussi subir la dénitrification, produire l'oxyde d'N (NO) ou l'oxyde nitreux (N₂O). Ces oxydes d'N sont susceptibles de détruire la couche d'ozone (Bockman et al., 1990). De plus, le N₂O absorbe les radiations infra-rouges et contribue à "l'effet de serre" (Duxbury et al., 1993).

Au Québec, la pollution d'origine agricole est importante et elle fait l'objet d'une surveillance continue (MENVIQ, 1993). Par exemple, il a été observé que la monoculture de maïs constitue l'une des principales causes de la dégradation des sols (Tabi et al., 1990). De plus, les activités agricoles sont à l'origine de la contamination des nappes phréatiques et des eaux de surface par les nitrates et les phosphates dans plusieurs régions du Québec (Grimard, 1990).

Malgré l'impact environnemental défavorable de la monoculture de maïs et l'existence de facteurs limitatifs liés au climat et aux besoins en N, la culture du maïs a connu une grande expansion au Québec au cours des 20 dernières années. Entre 1981 et 1994 par exemple, les superficies cultivées de maïs-grain sont passées de 165 400 à 281 000 ha. En 1994, la production de maïs-grain du Québec a été de 2 millions de tonnes pour une valeur totale d'environ 272 millions de dollars (Filion, 1996). Les principaux facteurs à l'origine du développement de cette production au Québec sont : la productivité élevée de la culture, la forte demande des productions animales et la mise en place d'une politique d'auto-suffisance en maïs-grain. Au cours de l'année 1994-1995, la proportion des besoins du marché intérieur couverte par la production locale était de 84 % (Chartrand et Bolduc, 1996).

La production de maïs-grain du Québec est concentrée dans les régions agricoles du Sud-Ouest-de-Montréal, du Haut-Richelieu, de Saint-Hyacinthe et des Bois-francs. En 1992, ces régions ont produit plus de 90 % de tout le maïs-grain récolté (Filion, 1996). Elles sont situées dans le Québec méridional, zone agro-climatique la plus favorable pour la culture du maïs. En effet, les saisons culturales y sont relativement plus longues et ces zones de production accumulent plus de 2 500 unités thermiques maïs (UTM). Le développement d'hybrides de maïs plus hâtifs rend maintenant possible la production de cette espèce dans les régions accumulant moins de 2 500 UTM, repoussant ainsi vers le nord la limite d'adaptation de cette culture.

La productivité du maïs a aussi augmenté grâce à l'adoption de régies intensives de culture (Fillon, 1996). Ces dernières reposent sur l'utilisation de taux de semis élevés, l'emploi de pesticides et surtout, l'application de doses importantes d'N minéral et organique. La popularité de ces régies au milieu des années 80 au Québec a favorisé un accroissement des doses d'N utilisées, sans qu'elles soient fondées sur des résultats de recherche obtenus localement (Barnett, 1996).

Le Conseil des productions végétales du Québec (C.P.V.Q.) recommandait la dose de 180 kg N ha⁻¹ pour la culture du maïs jusqu'en 1994. Depuis lors, cette recommandation a été restreinte à des valeurs allant de 120 à 170 kg N ha⁻¹ en fonction de la zone climatique (C.P.V.Q., 1994). Ces recommandations suggéraient aussi qu'il soit tenu compte des caractéristiques du sol, des précédents culturaux ou d'engrais, des taux et dates de semis et des exigences spécifiques des variétés. Mais, la recherche devant orienter ces recommandations n'avait toujours pas été effectuée localement.

De nombreux travaux ont étudié la fertilisation azotée du maïs au Québec, mais la plupart ont porté sur le maïs-fourrage (Cescas, 1971; Chamberland, 1975; Dionne et al., 1977; Isfan, 1985; Ziska et Isfan, 1990 et Isfan et al., 1995) par rapport au maïs-grain (MacKenzie, 1977, 1979; Bationo, 1979 et Tran, 1994). D'autres études ont examiné les rotations entre légumineuses à graines et maïs (Paré et al., 1992, 1993). Mais, aucune de ces études ne s'est penchée sur la fertilisation azotée du maïs-grain hâtif en rotation avec la luzerne, une des principales plantes fourragères produites au Québec.

Plusieurs effets bénéfiques ont été liés à l'utilisation de la luzerne dans les systèmes de culture. La rotation de la luzerne avec le maïs permettrait de limiter les problèmes de dégradation des sols liés à la monoculture de maïs et de constituer une source d'N pour le maïs qui suivrait dans une régie de rotation. En particulier, les luzernes annuelles pourraient être avantageuses dans les régions où la survie à l'hiver de cette

espèce est souvent compromise. Angers et Mehuys (1988) ont démontré que la structure d'un sol peut être améliorée à très court terme par l'implantation de la luzerne. Mais aucune étude n'a déterminé l'impact de la luzerne sur la nutrition azotée du maïs subséquent au Québec.

Dans une régie de rotation avec le maïs, la contribution de la luzerne à l'enrichissement du sol en N est un facteur important à connaître pour des raisons agronomiques et, qui plus est, pour la prévention et la réduction des dommages environnementaux dus aux nitrates. Le respect des doses optimales d'N dans les systèmes de culture est important, aussi bien dans les monocultures de maïs que dans les rotations du maïs avec la luzerne. L'impact de la luzerne dans la rotation est d'autant plus important à cerner qu'elle introduit des quantités d'N appréciables dans les systèmes de culture (Bruuslema et Christie, 1987).

Les travaux sur la valeur fertilisante des antécédents de légumineuses sont récents au Québec. Il s'agit d'un maillon important dans la maîtrise complète de la fertilisation des cultures. En particulier, les quantités d'N₂ atmosphérique fixées et le rendement en fourrage de luzernes non dormantes pendant l'année d'implantation ne sont pas connues. Il manque de données sur les besoins en N d'hybrides de maïs hâtifs et sur l'efficacité d'utilisation de l'N par des hybrides de précocité différente. Aucune donnée expérimentale n'existe sur les quantités d'N à créditer pour un précédent d'une année de luzerne annuelle. La connaissance de ces facteurs est importante d'où la pertinence de cette étude.

Les travaux réalisés dans le cadre de la présente thèse explorent plusieurs aspects de l'impact d'une luzerne non dormante sur la production du maïs-grain hâtif dans une région accumulant moins de 2 500 UTM au Québec. Le Chapitre II décrit les effets de la rotation et de la fertilisation azotée sur l'humidité du grain à la récolte, le rendement et l'indice de récolte. Le Chapitre III évalue la contribution de la luzerne à la nutrition

azotée de deux cultures subséquentes de maïs-grain. Le Chapitre IV est consacré à la détermination du potentiel de fixation de l' N_2 de la luzerne cv. Nitro et à l'étude de l'efficacité de l'utilisation de l' N de l'engrais par des hybrides hâtifs en monoculture ou après précédent de luzerne. Le Chapitre V présente la dynamique des nitrates dans les systèmes de culture impliqués. Au préalable, dans le Chapitre I, une revue de la littérature est présentée afin de mieux cerner les principales sources et pertes d' N dans les agro-écosystèmes, quelques aspects de la gestion de la fertilisation azotée en vue de la préservation de la qualité de l'environnement, l'importance de la fertilisation azotée dans la production du maïs et l'effet des légumineuses dans les systèmes de culture

CHAPITRE I

REVUE DE LA LITTÉRATURE

REVUE DE LA LITTÉRATURE

L'extension de l'aire de culture du maïs-grain vers les régions septentrionales à climat froid et à courte saison de croissance est surtout due à la création et à l'utilisation d'hybrides hâtifs. Dans la province du Manitoba (Canada) par exemple, le maïs est d'abord cultivé pour l'ensilage de la plante entière et par la suite, avec la création de nouveaux hybrides plus hâtifs, on le cultive pour le grain (Major et Hamilton, 1978). Une fois que des hybrides adaptés aux courtes saisons de croissance sont obtenus, des pratiques culturales doivent être définies pour assurer que les caractéristiques conférant cette adaptation s'expriment, que les rendements soient satisfaisants et que l'environnement soit préservé. Ces facteurs culturaux incluent la fertilisation azotée et les rotations culturales. Toutefois, les agro-écosystèmes peuvent être alimentés par plusieurs sources d'azote (N) et de nombreux mécanismes contribuent à la perte d'N.

1. Les principales sources d'azote dans les agro-écosystèmes

1.1. Les engrais minéraux azotés

Les engrais minéraux azotés sont abondamment utilisés en production végétale. Leur utilisation vise à compléter la fourniture naturelle d'N du sol et à réaliser les conditions d'une alimentation minérale équilibrée afin d'assurer de bons rendements aux cultures. La production annuelle de fertilisants azotés au monde est estimée à $73 \cdot 10^6$ Mg (FAO, 1995). Les principaux engrais azotés et leurs caractéristiques sont présentés par Tisdale et al. (1985). Les engrais minéraux azotés solubles élèvent la concentration des ions NO_3^- et NH_4^+ dans le profil cultural et ceux-ci peuvent alors être prélevés par les plantes.

Au Québec, environ 80 000 unités d'N sont vendues annuellement (Tran, 1996). Les engrais azotés les plus utilisés sont : l'urée (46-0-0), le nitrate d'ammonium (34-0-0), le nitrate d'ammoniaque calcique (27-0-0), le phosphate mono-ammoniacal (11-52-0), le phosphate bi-ammoniacal (18-46-0) et les engrais enrobés. Plusieurs facteurs affectent le choix d'une source d'N. Les plus déterminants sont : le prix par unité d'N, le matériel d'application disponible et le mode d'apport (en bande ou à la volée).

Au Québec, Zizka et Isfan (1990) ont observé que l'apport d'urée et du nitrate d'ammonium à la volée ou en bande donnait les mêmes rendements de maïs. Chen et MacKenzie (1993) ont cependant remarqué que l'effet du mode d'apport de l'urée sur le rendement du maïs dépend de l'intensité et de la distribution des précipitations après l'application d'engrais. L'application à la volée est moins efficace que l'application en bande lorsque les précipitations sont insuffisantes pour incorporer l'urée au sol.

1.2. Les fumures organiques

Une quantité importante d'N peut être apportée par des fertilisants organiques. Ces derniers sont composés de sous-produits animaux ou végétaux ou un mélange des deux. Les déjections animales en constituent l'essentiel (Bockman et al., 1990). Les fertilisants organiques renferment de l'N minéral sous forme d'ammonium (NH_4^+) et de nitrate (NO_3^-) et de l'N organique. La fraction minérale soluble est directement accessible aux plantes alors que la fraction organique ne devient disponible que progressivement après minéralisation.

L'N organique apporté au sol se retrouve sous une grande diversité de formes chimiques dont la dégradabilité varie. Simard (1995) conceptualise ces formes d'N organique en compartiments ou "pools" distincts selon la rapidité avec laquelle l'N qu'ils renferment peut être libéré. La minéralisation de l'N organique du sol peut alors être rapide ("pool" labile) ou s'échelonner sur plusieurs années ("pool" stable).

Les principaux fertilisants organiques utilisés au Québec sont : les fumiers de ferme solides (purin et lisier), les engrais verts (en culture dérobée, principale ou intercalaire) les résidus de culture et les composts. Plus de 30 millions de tonnes de fumier et de lisier sont produits chaque année au Québec; ils fournissent environ 90 000 T d'N (Tran 1996).

Le maïs est l'une des cultures de prédilection pour l'application des engrais de ferme, surtout dans les régions en situation de surplus de fumier. Toutefois, des apports répétés résultent en des accumulations d'N et de P à des niveaux excessifs ayant un impact négatif à long terme sur les eaux de surface (Simard, 1995).

1.3. La minéralisation des résidus de culture et de la matière organique du sol

La minéralisation est le processus biologique d'oxydation de la matière organique suivi de sa conversion en formes inorganiques et notamment en ions NO_3^- et NH_4^+ . La minéralisation de la matière organique innée constitue la principale source d'N minéral dans les écosystèmes naturels. Pendant une même période, plusieurs stocks organiques d'âge différents peuvent être affectés par le processus de minéralisation. Ces fractions sont caractérisées par des taux de minéralisation différents (Stevenson, 1986).

L'N de la matière organique est surtout présent dans les groupes amines (NH_2). Les principaux composés organiques identifiables du sol riches en N sont les acides et les sucres aminés. Le sol renferme d'infimes quantités d'acides nucléiques et de composés biochimiques azotés (Stevenson, 1982). Cambardella et Elliot (1992) identifient une fraction labile de la matière organique susceptible de libérer l'N très rapidement. Cet N dit particulaire peut représenter près du tiers de la matière organique du sol.

Les résidus des plantes libèrent une partie de l'N sous forme minérale alors que l'autre partie rentre dans le "pool" de matière organique stable du sol. Barber (1984) rapporte que l'N est libéré dans le sol durant les premiers stades de la décomposition des résidus végétaux lorsque leur rapport C/N est inférieur à 20. L'N apparaît alors au rythme de la décomposition des résidus.

L'ajustement des équations (modèles) cinétiques aux données de minéralisation permet d'estimer la quantité de substrat minéralisée et le taux de libération des formes assimilables par les plantes. De nombreux modèles cinétiques ont été proposés pour décrire la minéralisation de l'N dans le sol (Ellert et Bettany, 1988; Simard et N'dayegamiye, 1993). Les expériences d'incubation donnent un aperçu global des mécanismes de minéralisation. Les traceurs isotopiques permettent des descriptions plus précises du phénomène, l'identification des voies de dégradation et la spécification des classes de substrats.

1.4. Les légumineuses

La principale source d'N dans la biosphère est l'atmosphère; cette dernière est composée à 79,08 % en volume, du gaz N_2 (Haynes, 1986). L'incorporation de l'N atmosphérique (N_2) au sol a lieu à travers plusieurs mécanismes dont le plus important est la fixation biologique par des micro-organismes libres ou en symbiose avec des plantes dont les légumineuses (Haynes, 1986; Stevenson, 1986).

La quantité d' N_2 fixée annuellement par les symbioses végétales serait entre 139 et 170 x 10^6 Mg (Peoples et Craswell, 1992). Bien que la précision de cette estimation soit discutable, elle traduit tout de même l'importance du phénomène. Une fois la légumineuse enfouie ou récoltée, le processus de minéralisation libère l' N_2 fixé et contenu dans les résidus des légumineuses (Heichel, 1987; LaRue et Patterson, 1981).

L'N apporté au sol par les légumineuses ou encore par les engrais azotés enrichit le sol en N minéral et organique (Ladd et Amato, 1986). Cet N peut être absorbé par les cultures ou alors être perdu dans l'environnement.

2. Les mécanismes de perte d'N du sol

2.1. Le lessivage

Le lessivage d'N porte essentiellement sur les nitrates, ions en solution et peu retenus par les colloïdes du sol. Les pertes de nitrates par lessivage sont alors liées au mouvement de l'eau. En suivant le mouvement des eaux de drainage et ruissellement, les nitrates se retrouvent dans les eaux souterraines ou de surface (Jury et Nielsen, 1989).

La migration des nitrates est influencée par de nombreuses caractéristiques du sol, du climat et des techniques culturales. Une pluviométrie élevée augmente la quantité d'eau de drainage et par conséquent, la vulnérabilité au lessivage des nitrates présents dans le profil cultural. L'importance du lessivage varie avec la saison. Jones et Schwab (1993) ont observé des teneurs en nitrates des eaux de drainage maximales au printemps et minimales en été.

Le mouvement des nitrates est aussi affecté par la perméabilité, la capacité de rétention d'eau, la texture et la profondeur du sol (Knox et Moody, 1991). Une faible perméabilité du sol réduit les mouvements de l'eau et par conséquent celui des nitrates; de même, les sols avec une capacité de rétention d'eau élevée sont relativement moins drainés; dans les sols peu profonds et à texture sableuse, les nitrates peuvent facilement atteindre la nappe d'eau souterraine.

Au Québec, Chamberland (1976) a observé que l'apport de plus de 200 kg d'N ha⁻¹ sur le maïs avait causé une hausse des teneurs en nitrates résiduels dans le sol. Toutefois,

la nappe phréatique sous-jacente n'était pas affectée. Plus récemment cependant, des teneurs supérieures à 40 mg L⁻¹ ont été mesurées dans les drains sous des champs de maïs ayant reçu 200 kg N ha⁻¹ (MENVIQ, 1993).

Dans l'Est du Québec et en utilisant l'¹⁵N, Tran (1994) a observé des pertes totales d'N de 16 à 44 % entre deux printemps; ces pertes ont été accentuées par des précipitations et des accumulations de neige abondantes. Liang et MacKenzie (1994) ont aussi trouvé des pertes substantielles d'N par lessivage pendant la période hivernale.

Le lessivage des nitrates dépend également du système de culture. Plus le système cultural est intensif, plus important est le risque de lessivage (Bedeckovick, 1987). Les apports massifs d'N minéral par la fertilisation augmentent la quantité de nitrates dans le profil cultural et par conséquent, le risque de lessivage (Jones et Schwab, 1993). Xie et MacKenzie (1986) ont trouvé que l'N minéral résiduel dans le sol à la récolte de maïs était plus faible avec engrais minéraux comparativement aux amendements organiques. Singh et al. (1978) ont observé des pertes de nitrates plus importantes dans les monocultures par rapport aux rotations. Par contre, les pertes de nitrates peuvent être importantes suite à l'enfouissement de légumineuses de couverture (Bergström, 1987) ou de prairies (Bedeckovic, 1987).

2.2. L'érosion

Les érosions éolienne et hydrique enlèvent l'horizon de surface riche en matière organique et donc en N organique. Elles diminuent de ce fait, la capacité des sols à fournir l'N par minéralisation. On estime à environ 6 700 tonnes la quantité d'N perdue annuellement par l'érosion en milieu agricole au Québec (MENVIQ, 1993). Bruce et al. (1987) ont observé que la relation entre la perte de sol superficiel par érosion et la diminution du rendement est exponentielle. En plus de la diminution de la teneur en éléments nutritifs du sol dont l'N, l'érosion de surface diminue également la quantité d'eau disponible aux cultures.

2.3. Les pertes gazeuses

L'N du sol provenant de la fertilisation minérale ou de la fixation atmosphérique peut être perdu sous forme gazeuse par volatilisation de NH_3 , par nitrification, par dénitrification bactérienne, par réaction entre NO_2^- et différents constituants du sol ou encore par restitution de N_2 à l'atmosphère (Chalifour, 1993; Haynes et Sherlock, 1986).

La volatilisation de NH_3 intervient chaque fois que l'ammonium (NH_4^+) provenant des fertilisants azotés ou de composés organiques est près de la surface du sol (Haynes et Sherlock, 1986). La nitrification est le processus par lequel NH_4^+ est oxydé en NO_3^- en passant par NO_2^- . Au cours de ce processus qui fait intervenir les bactéries autotrophes des genres *Nitrosomonas* et *Nitrobacter*, il y a production de N_2 , NO et N_2O . Mais, les mécanismes des réactions qui interviennent ne sont pas tous élucidés (Mosier et Schimel, 1993).

L'ensemble des réactions chimiques de l'ion NO_3^- dans le sol conduit à la production de différents gaz azotés (N_2 , NO et NO_2 , et parfois N_2O). Ces réactions sont regroupées sous la dénomination chimiodénitrification. La dénitrification biologique quant à elle est un processus de respiration bactérienne au cours duquel des oxydes d'N, principalement NO_3^- et NO_2^- , sont réduits de façon séquentielle en NO , N_2O et N_2 (Chalifour, 1993). La dénitrification biologique est aussi appelée dénitrification dissimilatoire puisque les produits de la réduction de NO_3^- soit NO , N_2O et N_2 , ne sont pas assimilés par les micro-organismes, mais rejetés dans l'atmosphère (Haynes, 1986).

Le N_2O produit de cette façon joue un rôle important dans les réactions chimiques qui se déroulent dans la stratosphère. Ces dernières ont un intérêt environnemental puisque l'oxyde d'N (NO) issu de la dissociation photochimique de N_2O contribue à la destruction de la couche d'ozone et à "l'effet de serre" (Bockman et al., 1991).

3. Gestion de la fertilisation azotée et conservation de l'environnement

3.1. Devenir des fumures azotées

La connaissance des principales transformations de l'N dans le sol constitue un préalable essentiel à l'optimisation de la fertilisation azotée. L'N minéral ou organique ajouté au sol subit des transformations qui ont été résumées par Tran et al. (1992). L'ammonium provenant des engrais azotés ou de la minéralisation de la matière organique du sol peut subir la nitrification et engendrer des nitrates. Les formes ioniques de l'N du sol (NH_4^+ et NO_3^-) peuvent être assimilées par les micro-organismes telluriques (réorganisation de l'N minéral); se fixer sur les colloïdes du sol ou dans les espaces interfeuilletés des argiles; être absorbées par les plantes; perdues sous forme gazeuse par volatilisation d'ammoniac ou par dénitrification des nitrates. Ces derniers peuvent aussi subir un lessivage en profondeur vers les nappes phréatiques selon le mouvement de l'eau. Ces transformations et transferts de l'N dans le sol forment un système complexe et très dynamique dénommé "cycle de l'azote".

Une meilleure appréciation de ces phénomènes a été possible grâce aux études de suivi du devenir des fumures azotées dans le système sol-plante-eau. Les premières études sur la dynamique de l'N qui utilisaient l'N non marqué ne permettaient pas de distinguer l'origine de l'N. Le recours aux engrais enrichis ou appauvris en ^{15}N vers 1970 a permis de mieux étudier les transformations de l'N du sol (Legg et Meisinger, 1982). Cette méthodologie faisant usage d'un traqueur s'est révélée la plus performante pour l'étude du devenir des fumures azotées (Guiraud, 1987).

Dans l'Est du Québec, Tran (1994) a étudié le devenir du $^{15}\text{NH}_4$, $^{15}\text{NO}_3$ appliqué au maïs. Les prélèvements d'N de l'engrais minéral par le maïs ont varié de 79 à 96 kg N ha⁻¹, ce qui représentait 44 à 53 % de la dose (180 kg N ha⁻¹) appliquée. Les quantités d'engrais résiduel sous forme minérale à la récolte ont varié de 2 à 21 % de l'N apporté

et étaient affectées par les conditions climatiques et la texture du sol. Après l'hiver, il résiduel sous forme minérale dans le profil de sol représentait seulement 1 à 5 % de la dose d'N appliquée initialement.

Liang et Mackenzie (1991, 1994) ont aussi observé des pertes substantielles d'N de l'engrais durant la période hivernale. Près de 70 % de l'N apporté au-delà des quantités recommandées se retrouvait dans le sol en automne mais aucune accumulation d'N n'était observable au printemps. Tran (1994) a rapporté que les quantités totales d'N minéral issu du sol et de l'engrais résiduel à la récolte étaient de 55 à 60 kg N ha⁻¹ en année pluvieuse ou en sol graveleux et entre 84 et 176 kg N ha⁻¹ en année plus sèche. Des quantités importantes d'N minéral dans le sol à la récolte du maïs ont aussi été trouvées par Isfan et al. (1995): ces quantités variaient entre 74,5 dans un sol léger et 145,5 kg N ha⁻¹ dans un sol lourd suite à l'application de 200 kg N ha⁻¹.

Tran (1994) a déterminé l'engrais azoté résiduel sous forme organique ou fixé. Cette fraction représentait entre 14 et 38 % de l'N appliqué et elle était fortement influencée par les conditions climatiques et la texture du sol. Dans cette dernière étude, l'N de la fraction organique a connu une variation de 1 à 4 % pendant la période hivernale, ce qui corrobore l'assertion selon laquelle l'immobilisation dans la matière organique et la fixation sur les colloïdes du sol contribuent à réduire les pertes d'N du profil cultural.

3.2. Pratiques culturales pour réduire la perte des nitrates

3.2.1. La collecte et l'épandage des effluents d'élevage

Une meilleure connaissance de la valeur fertilisante des effluents d'élevage ainsi que de leur devenir dans le sol est essentielle. Dans certains cas, les apports d'N provenant des déjections animales dépassent les possibilités d'utilisation rationnelle et les capacités agronomiques des sols destinés à les recevoir (Bedekovic, 1987). Ces effluents en excès doivent alors être exportés avec ou sans traitement.

Au Québec, les engrais de ferme ont dépassé 32 millions de tonnes en 1992 et proviennent à 53 % des élevages des bovins laitiers, 27 % de la production porcine, 11 % des bovins de boucherie et 4 % de la production avicole (Bélanger, 1996). Leur production est inégale sur l'ensemble de la province et elle pose des problèmes d'entreposage et de surplus dans les régions Chaudière-Appalaches, Estrie, Montérégie et Lanaudière. Les solutions recommandées comme leur exportation, entre autres, dépassent souvent le cadre des pratiques agricoles.

3.2.2. L'ajustement des besoins et des apports d'engrais azotés

L'apport d'engrais azotés aux cultures en rapport avec leurs besoins réels est une approche très utilisée avec la méthode du bilan azoté. Meisinger et Randall (1991) proposent une méthode détaillée du bilan d'N pour les systèmes sol-plante. Bock et Hergert (1991) suggèrent que le choix d'une dose d'N devrait s'effectuer en tenant compte du prélèvement d'N, du coefficient réel d'utilisation de l'N appliqué, de l'objectif de rendement et des contributions en N autres que la fertilisation. Ces dernières incluent la minéralisation, les précipitations et les antécédents culturaux.

Les études de bilan azoté montrent que les plus grandes pertes d'N ont lieu dans des sols recevant plus de fumure ou d'N minéral par rapport aux exportations des cultures (Legg et Meisinger, 1982). Ces sols seraient également ceux où une gestion appropriée de la fertilisation azotée aurait le plus d'impact sur la réduction de la contamination des nappes phréatiques.

L'adéquation entre les besoins et les apports d'engrais dans les systèmes de culture est à la base de la fertilisation raisonnée ou intégrée. Au Québec, les producteurs agricoles et leurs conseillers adhèrent de plus en plus à l'approche globale de fertilisation intégrée pour améliorer la situation des fermes sur les plans agronomique, économique et environnemental (Ménard, 1996).

3.2.3. Le fractionnement de la fertilisation azotée

Le fractionnement de l'apport d'engrais azotés vise essentiellement à fournir l'N aux cultures aux périodes où elles en ont besoin. En effet, un apport d'N coïncidant à une période d'absorption intense favorisera une meilleure utilisation (Machet, 1987; Tran, 1994). Dans ce sens, Bockman et al. (1990) proscrivent l'épandage de fertilisants azotés en automne.

Chalifour (1982) a démontré que dans les conditions de l'est du Québec, l'apport de 25 kg N ha⁻¹ à la levée suivi de l'application du reste de la dose d'N au stade 6 à 8 feuilles (initiation de la panicule) est la méthode optimale pour la production de maïs-fourrage. En France, Plenet et al. (1990) ont aussi observé que le fractionnement d'N en deux apports permet d'obtenir des rendements supérieurs à ceux obtenus avec une seule application. Toutefois, un fractionnement plus important n'a pas engendré d'amélioration significative du rendement.

3.2.4. L'utilisation d'inhibiteurs de la nitrification

Les inhibiteurs de la nitrification ont pour objet d'améliorer l'efficacité d'utilisation des engrais azotés (Zhang et al., 1992). Les pertes par lessivage et par dénitrification interviennent principalement lorsque l'N est appliqué sous forme de nitrates ou après la conversion des autres formes en nitrates.

L'inhibition ou le ralentissement de la nitrification de l'ammonium et des amides peuvent diminuer le processus de nitrification et améliorer l'efficacité d'utilisation de l'N. Prasad et al. (1971) présentent une revue des principaux inhibiteurs de la nitrification et des engrais à libération lente d'N. Ces derniers peuvent contribuer à limiter les pertes d'N au Québec où le lessivage et la dénitrification sont importants.

3.2.5. Les rotations culturales

La rotation de cultures ayant des besoins en N différents ou exploitant le sol à des profondeurs différentes permet un meilleur contrôle de la fuite des nitrates dans le profil cultural. Les plantes de couverture permettent de limiter les périodes où le sol reste nu et pendant lesquelles le lessivage des nitrates est abondant (Bedekovick, 1987). La mise en place de plantes de couverture et des cultures dérobées permet d'absorber l'N résiduel et de le réorganiser en N organique (Bockman et al., 1990).

Mathers et al. (1975) ont observé que la luzerne est très efficace dans le recyclage des nitrates parvenus en profondeur. Toutefois, la teneur en N du sol a une influence sur l'efficacité de la luzerne à prélever l'N du sol. Ainsi, lorsque les teneurs en N sont élevées, la luzerne fixe moins d' N_2 atmosphérique; elle utilise alors l'N du sol jusqu'en profondeur (Peterson et Russelle 1991). La présence des nitrates en concentrations élevées réduit l'initiation de la nodulation chez la luzerne (Freire, 1984).

4. Fertilisation azotée du maïs

4.1. L'importance de l'N pour les plantes

L'N fait partie des éléments nutritifs majeurs utilisés par les plantes. Quantitativement, c'est le quatrième constituant des plantes (Epstein, 1972). Cet élément essentiel fait partie de molécules importantes telles que les protéines, les nucléotides, les acides nucléiques, la chlorophylle, etc. Les protéines végétales renferment environ 18 % d'N, mais les concentrations varient selon le type de protéines.

L'N favorise l'utilisation des hydrates de carbone, stimule le développement et l'activité racinaires et par conséquent, favorise l'absorption des autres éléments minéraux et la

croissance des plantes (Stevenson, 1986). La qualité et le niveau de la nutrition azotée ont une grande incidence sur l'acquisition du carbone par les plantes. L'N est essentiel pour la synthèse des enzymes de la photosynthèse (Lamaze et al., 1990).

L'importance des quantités d'N utilisées par les plantes en fait l'un des facteurs limitants les plus courants de la production agricole. Le maïs est une plante qui répond bien à la fertilisation azotée (Mvondo-Awono, 1988; Isfan et al., 1995). La réponse des plantes aux engrais azotés est considérable sur les sols ayant une faible capacité de minéralisation de l'N (Tran et al., 1992). Les carences ou les excès d'N posent des problèmes agronomiques importants. Ils interfèrent avec le fonctionnement normal des phénomènes cellulaires. Ces interférences se traduisent alors par des pertes dans la productivité et la qualité des produits récoltés.

4.2. L'acquisition de l'azote

Les plantes absorbent l'N sous forme de nitrates (NO_3^-) et d'ammonium (NH_4^+). L'importance relative de chacune de ces formes varie en fonction de plusieurs facteurs dont l'espèce végétale et les conditions du milieu (Layzell, 1990). Les circonstances au cours desquelles les plantes préfèrent l'un ou l'autre ion sont décrites par Hageman (1984). Toutefois, l'N nitrique est la forme prédominante d'N absorbée par le maïs dans les écosystèmes agricoles.

La vitesse d'absorption des deux ions est la même chez le maïs. Une fois absorbés cependant, les nitrates doivent d'abord être réduits en NH_4^+ avant leur incorporation dans les synthèses cellulaires. L'ion NH_4^+ peut être métabolisé immédiatement dans les racines et son absorption diminue l'assimilation des ions NO_3^- (Schrader et al., 1972). Aux concentrations élevées, les ions NH_4^+ peuvent être toxiques et provoquer une diminution de croissance (Goyal et Huffaker, 1984).

Chez le maïs, l'apport simultané d'ions NO_3^- et NH_4^+ favorise le rendement (Tendille et al., 1972). Les ions NH_4^+ formés suite à la réduction des ions NO_3^- ou directement absorbés sont intégrés dans les acides aminés, précurseurs d'autres composés azotés dont les protéines et les acides nucléiques sous l'action conjuguée de deux enzymes la glutamine synthétase et la glutamate synthase ou sous l'action d'une glutamate déshydrogénase (Jolivet et Morot-Gaudry, 1984). En fonction de l'N disponible, des conditions de milieu et de l'état physiologique des plantes, les quantités d'N absorbées peuvent être insuffisantes, adéquates ou en excès. Les carences ou les excès d'N peuvent affecter la productivité et la qualité du maïs.

4.3. Les carences d'N

Les manifestations de carence azotée chez le maïs varient selon l'intensité du déficit. En général, on observe un ralentissement de la croissance, une diminution des dimensions des feuilles, un amincissement des tiges et une réduction du nombre de tiges (Tucker, 1984). Les plantes carencées prennent progressivement une coloration vert-pâle, puis jaune. Le développement de cette chlorose s'effectue des vieux organes aux tissus plus jeunes, dans le sens de la translocation de l'N (Epstein, 1972).

La chlorose des plantes carencées en N est due au blocage de la synthèse de la chlorophylle. En fait, l'arrêt de la synthèse des protéines est l'un des effets biochimiques majeurs d'une carence d'N (Goodwin et Mercer, 1986). En général, l'apparition de signes visibles de déficience est une indication que la capacité de production de l'espèce est affectée. Toutefois, des baisses de productivité peuvent être associées aux carences d'N même sans symptôme apparent.

Le maïs dont la croissance est limitée par une très faible disponibilité d'N présente une activité photosynthétique diminuée; la dissipation de l'énergie lumineuse sous forme de chaleur est accrue et la portion de l'énergie radiative utilisée par la photosynthèse

est réduite (Lamaze et al., 1990). De plus, le déficit d'N a un impact négatif sur l'élaboration des composantes du rendement (Plenet et al., 1990).

Les diminutions de rendement observées dans la majorité des cas sont liées à une réduction cumulée de deux composantes : le nombre de grains par unité de surface et le poids moyen des grains (Plenet et al., 1990). La réduction du nombre de grains en croissance permet une meilleure adéquation entre les sources disponibles et les puits restants. Les phénomènes de compensation à l'instar de la translocation interne de l'N à partir d'autres organes évitent des réductions trop importantes du rendement.

4.4. L'excès d'azote

L'excès d'N favorise un développement végétatif excessif et donne souvent une couleur vert-foncé aux plantes. Plus particulièrement chez le maïs, une nutrition azotée excessive augmente la durée de la phase végétative, retarde la maturation et augmente la susceptibilité à la verse (Mvondo-Awono, 1988).

La sensibilité à la verse est particulièrement exacerbée dans les régions septentrionales chez les hybrides hâtifs cultivés avec de fortes doses d'N (Saint-Pierre et Chevrette, 1979). En effet, ces derniers ont une résistance mécanique plus faible due à une lignification moins poussée que les hybrides tardifs et à un faible nombre de racines d'ancrage. La succulence souvent observée chez les plantes recevant des doses d'N élevées augmente leur susceptibilité aux maladies et aux attaques des ravageurs (Mvondo-Awono, 1988).

L'absorption excessive des ions NH_4^+ réduit celle des autres cations et notamment Ca^{2+} , Mg^{2+} et K^+ . Cox et Reisenauer (1973) attribuent la baisse de l'absorption des autres cations lorsque la concentration de NH_4^+ augmente dans le milieu par la compétition pour les sites d'absorption et par l'augmentation des protons H^+ excrétés

dans le milieu. La toxicité des ions NH_4^+ , lorsqu'ils sont abondants, se traduit par une réduction de la croissance et des dommages foliaires chez le maïs sucré (Goyal et Huffaker, 1984).

Chez les céréales en général, la quantité de protéines augmente rapidement lorsqu'on dépasse la dose d'N permettant d'obtenir le rendement maximal (Deckard et al., 1984). La nutrition azotée affecte aussi la qualité des protéines. Chez le maïs, l'accroissement de la teneur en protéines s'accompagne d'une baisse de leur valeur biologique à cause de l'accentuation du déséquilibre protéinique dû à la lysine (Deckard et al., 1984).

4.5. Détermination des besoins en N

Les corrélations entre doses d'N appliquées, concentration en N des plantes, N absorbé, et rendements sont abondamment utilisées pour déterminer les doses d'N optimales pour la culture du maïs (Isfan et al., 1995). Stanford (1973) a observé que le rendement maximal du maïs est obtenu lorsque les plants entiers contiennent environ 1,2 % d'N; très peu d'augmentations de rendement furent observées à des concentrations supérieures d'N. Walker et Peck (1972) ont observé qu'il existe une relation étroite entre la composition chimique de la plante et le rendement du maïs. Binford et al. (1992) ont trouvé une relation significative entre la dose d'engrais azoté et la concentration en N des jeunes plants de maïs.

L'existence de telles relations a permis l'utilisation des courbes de réponse pour déterminer les besoins en N du maïs. Les courbes de réponse peuvent aussi être utilisées pour déterminer les quantités d'N nécessaires à l'obtention d'un rendement donné (Stanford et Legg, 1984). Les principales courbes de réponse utilisées pour déterminer les besoins en N ont été revues par Black (1993). Il s'agit de : l'équation de Mitscherlich, les fonctions polynomiales, les fonctions polynomiales inverses et les fonctions segmentaires.

La dose optimale d'N déterminée varie selon le modèle choisi (Cerrato et Blackmer, 1990). Le choix d'un modèle est alors une étape décisive à la détermination des besoins en N des cultures. Les équations quadratique, quadratique-plateau et linéaire-plateau ont abondamment été utilisées pour la détermination des besoins en N du maïs au Québec (Tran, 1994; Liang et Mackenzie, 1994; Isfan et al., 1995).

5. Effets des légumineuses dans les systèmes de culture

5.1. Impact des légumineuses sur les cultures compagnes

Patra et al. (1986) ont observé que la décomposition des racines et des nodosités de la légumineuse pendant la saison de croissance fournit de l'N aux cultures compagnes. Le transfert d'N par excrétion directe a été mis en évidence par Eaglesham et al. (1981) et Van Kessel et al. (1985).

Le transfert d'N dans les associations culturales a surtout été mis en évidence dans les expériences en pots (Ledgard et al., 1985; Van Kessel et al., 1985; Hamel et Smith, 1991) et très peu en plein champ. Ledgard et al. (1985) ont observé que 2,2 % de l'N du trèfle (*Trifolium subterraneum* L.) avait été transféré au ray-grass (*Lolium rigidum* Gaud.) associé en pot. Van Kessel et al. (1985) ont observé des transferts d'N par le biais des mycorrhizes. Martin et al. (1991) rapportent des transferts d'N de l'ordre de 3,68 kg ha⁻¹ du soja au maïs associé. Par contre, Hamel et al. (1991) n'ont pas observé de transfert d'N entre ces deux espèces associées.

5.2. Impact des légumineuses sur les cultures subséquentes

L'N fixé par les légumineuses peut être utilisé avantageusement par les cultures subséquentes. Les expressions "effet résiduel de l'N", "valeur de remplacement du fertilisant azoté" (VRFA) ou "équivalent N" ont souvent été utilisées pour exprimer la

contribution en N des légumineuses aux cultures subséquentes (Chalfour, 1993). Par exemple, en utilisant la méthode de traçage isotopique, Harris et Hesterman (1990) ont observé que la proportion d'N provenant de la luzerne à une culture de maïs subséquente était de 17 et 25 %. Elle a été ensuite de 1 % pour une seconde culture d'orge.

Les quantités d'N disponibles aux cultures suivant les légumineuses sont très variables. Elles dépendent de plusieurs facteurs dont le stade de maturation des résidus de légumineuses (Senaratne et Hardarson, 1988) : plus la légumineuse est mature, plus la minéralisation sera lente en raison d'un rapport C/N élevé. Bremner et Van Kessel (1992) ont observé que le recouvrement d'¹⁵N par le blé était de 5,5 % après l'incorporation de pailles de lentilles alors qu'il était près de 40 % lorsque la lentille était utilisée comme engrais vert.

En fonction des conditions environnementales et des pratiques culturales, le bilan azoté du sol peut être négatif suite à une culture de légumineuses (Eaglesham et al., 1982; Paré et al. 1992). Par exemple, l'incorporation de résidus de légumineuses après une récolte des graines (Senaratne et Hardarson, 1988; Paré et al., 1992) ou après plusieurs coupes (Heichel, 1987; Sheaffer et al., 1989) retourne au sol des quantités d'N limitées. Chalk et al. (1993) observent que les résidus de légumineuses ne contribuent à l'N du sol que si la proportion de l'N dérivée de la fixation pour les plantes entières est plus élevée que l'indice de récolte pour l'N.

Il est aussi possible que l'N provenant de la légumineuse en décomposition ne soit pas disponible au moment où les besoins de la culture subséquente sont élevés (Huntington et al., 1985; Sarrantonio et Scott, 1988). Cet N ne contribue donc pas nécessairement à la nutrition de la culture suivant directement la légumineuse. Il participe plutôt à la contamination de l'environnement.

L'apport d'N au sol par les légumineuses n'expliquerait pas en totalité les rendements élevés des cultures subséquentes. D'autres "effets de rotation", non liés à l'apport d'N au sol, expliquent aussi les rendements supérieurs des céréales subséquentes aux légumineuses (Heichel, 1987; Russelle et al., 1987). Ces "effets de rotation" incluent : l'amélioration des propriétés physiques du sol, l'élimination de substances phytotoxiques du sol, l'addition de promoteurs de croissance et la réduction de l'incidence d'insectes nuisibles et des maladies.

5.3. L'enrichissement des teneurs en N du sol

Une partie de l'N fixé par les légumineuses retourne peut rester dans le sol sous forme organique. Ladd et Amato (1986) ont observé qu'environ 60 à 65 % de l'¹⁵N des résidus de légumineuse restait dans le sol après 32 semaines de décomposition au champ. Harris et Hesterman (1990) rapportent qu'après incorporation de résidus de luzerne, 46 % en moyenne de l'apport initial était recouvert par le sol et 96 % de cet N retenu était sous forme organique dont 18 % intégré à la biomasse microbienne. Les légumineuses contribuent ainsi au réapprovisionnement des réserves du sol en N organique. La contribution de cet N aux cultures subséquentes serait graduelle, comparativement aux fertilisants azotés (Chalifour, 1993).

5.4. L'utilisation de la luzerne comme plante annuelle

La versatilité de la luzerne en fait une culture de choix dans les systèmes de culture. Elle peut être utilisée comme pâturage, foin, ensilage, engrais vert ou légume. L'utilisation de la luzerne comme plante annuelle est de plus en plus envisagée par les producteurs de céréales (Sheaffer et al., 1988). À cette fin, la luzerne non dormante cv. Nitro a été développée dans l'État du Minnesota en visant deux objectifs spécifiques: maximiser le rendement en fourrage pendant l'année d'implantation et contribuer à la nutrition azotée des cultures subséquentes (Pfarr, 1987; Sheaffer et al., 1988).

Au Québec, les premières gelées mortelles interviennent dès le mois de septembre dans certaines régions. Au cours de l'hiver, des pluies importantes suivies de gels brusques et sévères présagent d'une destruction partielle ou sévère des luzernières (Ouellet et Desjardins, 1981). L'exposition directe à des températures de -12 à -16 °C contribue à la mortalité de la majorité des plants de luzerne endurcis au froid (Belzile et al., 1987).

Les variétés non dormantes de luzerne (à l'instar du cv. Nitro) ne s'endurcissent pas à l'hiver et de ce fait, elles peuvent maximiser les quantités d'N et de biomasse végétale qui retournent au sol dans une régie de rotation suite à une seule année de production. Barnes et al. (1985) ont observé qu'une variété non dormante de luzerne sélectionnée pour l'accumulation d'N dans les racines et les collets avait le même rendement en fourrage que les variétés dormantes les plus adaptées, mais qu'elle accumulait 62 % fois plus d'N. Les variétés non dormantes pourraient présenter un intérêt réel pour les rotations de courte durée au Québec.

5.5. Détermination de l'apport des légumineuses dans les systèmes de culture

5.5.1. Fixation d'N₂ atmosphérique

L'une des caractéristiques importantes des légumineuses est leur capacité de fixer l'N₂ atmosphérique à travers les symbioses avec des bactéries telluriques. Il s'agit en particulier des bactéries des genres *Rhizobium* et *Bradhyrhizobium* (Paré et Chalifour, 1993). Lorsque la symbiose est effective, la légumineuse n'utilise alors que très peu d'N minéral.

Plusieurs méthodes ont été utilisées pour estimer la fixation d'N₂ par les légumineuses. Ces dernières ont été revues par Bergersen (1980) et Hardarson et Danso (1993). Les méthodes les plus courantes sont fondées sur : le poids de la matière sèche des parties

aériennes, la différence d'N total, l'importance relative des nodosités, la réduction à l'acétylène, le dosage des composés azotés dans le xylème ou l'utilisation de traceurs isotopiques. Le choix de la méthode dépend des objectifs de l'expérience et des ressources disponibles.

5.5.2. Transfert d'azote aux cultures subséquentes

La valeur de remplacement en fertilisant azoté (V.R.F.A.) est une méthode abondamment utilisée pour déterminer la contribution des légumineuses à la nutrition azotée des cultures subséquentes. La base du concept de V.R.F.A. est la quantité de fertilisant azoté requise par une culture subséquente à une culture de non légumineuse pour obtenir un rendement équivalent à celui obtenu après incorporation d'une légumineuse et, sans application d'engrais (Hesterman, 1988). La méthode comporte dans un premier temps, l'établissement d'une courbe de réponse de la non légumineuse (par exemple le maïs), à l'N en utilisant plusieurs doses d'N minéral et ensuite, de comparer les rendements de la non légumineuse obtenus suite à une culture de légumineuse (par exemple la luzerne) et sans apport d'N, à ceux de la courbe de réponse au fertilisant azoté. Ce concept a été utilisé par Paré et al. (1992, 1993a) au Québec pour déterminer la V.R.F.A. d'une ou deux années de féverole ou de soja pour la production de maïs-fourrage. Le crédit d'N est diminué d'une valeur équivalente à celle de l'engrais de démarrage lorsque ce dernier est appliqué (Decker et al., 1993).

La détermination de la contribution de l'N résiduel d'une légumineuse au rendement ou à la composition d'une non légumineuse subséquente peut aussi être faite par la technique de traçage isotopique (Senaratne et Hardarson, 1988; Chalk et al., 1993). Un engrais azoté enrichi ou appauvri en ^{15}N est appliqué à une non légumineuse en monoculture et après un précédent de légumineuse. Dans le cas d'un engrais appauvri en ^{15}N , si la légumineuse contribue de façon significative à la nutrition azotée de la culture subséquente, la valeur d'excès atomique (e.a.) ^{14}N du grain qui suit cette

légumineuse devrait être plus faible que la valeur d'e.a. ^{14}N de la non légumineuse en monoculture (dilution isotopique). De même, si la légumineuse contribue de façon significative au rendement de la non légumineuse subséquente, le rendement devrait être supérieur dans un système de rotation avec la légumineuse par rapport à la non légumineuse en monoculture.

La valeur des méthodes non isotopiques souffre de nombreuses contestations. Ainsi, Hesterman et al. (1979) soulignent que la VRFA surestime l'apport d'N des légumineuses. En général, les méthodes faisant usage de l'N marqué indiquent que l'utilisation de l'N d'une légumineuse précédente est plutôt faible. Alors que la VRFA de la luzerne est estimée être entre 100 et 125 kg N/ha dans le "Midwest" Américain (Bullock, 1992), dans le Michigan, Harris et Hesterman (1990) ont estimé, en utilisant la technique de traçage isotopique, que cette contribution n'était que 24 kg N/ha. Par la même technique, Chalk et al. (1993) ont observé que la contribution du lupin (*Lupinus angustifolius* L.) à l'orge (*Hordeum vulgare* L.) subséquent était de 34 kg N ha⁻¹.

Harris et Hesterman (1990) avancent que la surestimation de la VRFA provient d'une part du fait qu'elle ne distingue pas l'effet d'N des autres effets de rotation. De plus, la VRFA ne saurait expliquer les différences de prélèvement et par conséquent, de rendement entre monocultures et rotations culturales faisant intervenir des légumineuses. Senaratne et Hardarson (1989) observent que le prélèvement d'N par les céréales est plus élevé que celui des légumineuses lorsque des conditions favorables à la fixation symbiotique d'N prévalent.

La conservation de l'N du sol par les légumineuses est aussi mentionnée par Chalk et al. (1993). Ces derniers expliquent que les légumineuses peuvent contribuer à l'N du sol par la fixation symbiotique mais, qu'elles pourraient également prélever moins d'N du sol et par conséquent, en laisser plus pour une culture subséquente puisqu'une partie de leurs besoins est satisfaite par la fixation d'N₂ atmosphérique. Ainsi, la VRFA

ne fait pas de différence entre l' N_2 fixé biologiquement et l'effet de conservation d' N du sol favorisé par les légumineuses.

6. Les hypothèses de la recherche

Le Québec appartient à une zone limite d'adaptation du maïs lorsqu'on considère ses besoins thermiques. L'expansion de cette culture est en majeure partie due à la création et à l'utilisation d'hybrides hâtifs. Leurs besoins en N dans les régions à courte saison de croissance sont cependant mal connus aussi bien en monoculture que dans les rotations. Les principales hypothèses testées dans cette étude sont :

- a. Les doses d' N minéral recommandées pour la culture du maïs-grain au Québec (120 à 170 kg ha^{-1}) sont trop élevées par rapport aux besoins réels des hybrides précoces.
- b. Dans la zone de 2300 à 2500 unités thermiques maïs (UTM), les hybrides de maïs plus hâtifs ont des exigences en N , des taux d'utilisation d' N et des rendements plus faibles que les hybrides plus tardifs.
- c. Une culture de luzerne annuelle, tout en procurant une production abondante de fourrage l'année d'implantation, contribue à préserver l' N du sol et à augmenter la teneur en N du sol grâce à la fixation symbiotique d' N atmosphérique; cet N contribue de façon significative à la nutrition azotée du maïs subséquent.
- d. La dose optimale pour la culture du maïs-grain est plus faible lorsque cette dernière est précédée d'une année de luzerne comparativement à la dose optimale en monoculture; ceci serait attribuable à la conservation et à l'apport d' N au sol par la culture de luzerne précédente, et au transfert de cet N à la culture du maïs qui suit.

7. Les objectifs de l'étude

La présente étude a pour objectif général d'améliorer notre compréhension de l'impact de l'inclusion d'une luzerne annuelle dans les rotations avec le maïs dans la région de 2 300 à 2 500 UTM du Québec. Pour atteindre cet objectif, nous avons effectué une expérience de rotation incluant trois hybrides de maïs précoce (Northrup King 0565, Pioneer 3979 et Pioneer 3962) et la luzerne non dormante cv. Nitro. Les hybrides de maïs ont reçu 10, 60, 120 ou 180 kg N ha⁻¹ et étaient cultivés en monoculture ou subséquentement à la luzerne. Les objectifs spécifiques de cette étude étaient :

- l'estimation du potentiel de fixation de la luzerne non dormante cv. Nitro;**
- la détermination des effets de la rotation et de la fertilisation azotée sur le rendement, l'indice de récolte et l'humidité du grain à la récolte du maïs hâtif;**
- l'évaluation de la contribution de la luzerne cv. Nitro à la nutrition azotée de deux cultures subséquentes de maïs;**
- la caractérisation des sources d'N du maïs et de l'efficacité d'utilisation de l'N d'un engrais par trois hybrides de maïs hâtifs en monoculture ou après précédent de luzerne;**
- l'étude de l'impact sur les nitrates du sol, de la monoculture de maïs et de la luzerne en tête de rotation.**

CHAPITRE II

EFFETS DE LA ROTATION AVEC LA LUZERNE ET DE LA FERTILISATION AZOTÉE SUR LE RENDEMENT D'HYBRIDES PRÉCOCES DE MAÏS

EFFETS DE LA ROTATION AVEC LA LUZERNE ET DE LA FERTILISATION AZOTÉE SUR LE RENDEMENT D'HYBRIDES PRÉCOCES DE MAÏS

Résumé

Les légumineuses en fixant l'azote atmosphérique (N_2) peuvent contribuer à la nutrition azotée et à l'augmentation du rendement du maïs-grain (*Zea mays* L.) dans les régions à courte saison de croissance. L'impact du précédent cultural (maïs en monoculture vs maïs précédé d'une année de luzerne non dormante (*Medicago sativa* L. var. Nitro) et de la dose d'azote (10, 60, 120 ou 180 kg ha⁻¹) sur l'humidité du grain à la récolte, le rendement en grain et en cannes et l'indice de récolte, a été étudié pour trois hybrides de 1992 à 1994 sur loam sableux Rivière du Loup (Podzol humo-ferrique) et sur sol argileux Kamouraska (Gleysol humique) dans l'Est du Québec. Les hybrides étudiés étaient Northrup King 0565, Pioneer 3979 et Pioneer 3962. La réponse à l'azote (N) a varié en fonction de l'hybride (H) et de la culture utilisée en tête de rotation (TR). La contribution du précédent de luzerne au rendement a été plus importante lorsque la dose d'N appliquée était plus faible. L'effet du précédent de luzerne a été plus marqué en 1993 par rapport à 1994. L'augmentation de rendement due au précédent de luzerne Nitro a varié de 15 à 37 % en 1993 et de 4 à 6 % en 1994. Les effets de rotation autres que l'N ont augmenté les rendements jusqu'à 8 % en 1993 et 6 % 1994. Les doses optimales d'N ont varié de 0 à 122 kg N ha⁻¹ en rotation et de 83 à 115 kg N ha⁻¹ pour le maïs en monoculture. L'indice de récolte et l'humidité du grain à la récolte ont surtout été affectés par les différences entre hybrides. Des interactions significatives N x H, N x TR et H x TR pour les rendements en grain et en cannes, l'indice de récolte et la teneur en eau du grain à la récolte suggèrent que dans les régions à courte saison de croissance, la réponse à l'azote dépend de l'hybride cultivé et du précédent cultural.

EARLY MATURING CORN HYBRIDS YIELDS AS AFFECTED BY ROTATION WITH ALFALFA AND NITROGEN RATE

Abstract

Legume crops that fix atmospheric dinitrogen (N_2) are alternatives to N fertilizer and can improve yields of subsequent early corn (*Zea mays* L.) in cool and humid climates. The influence of hybrid type rotation (corn monoculture vs corn following one year of non dormant alfalfa (*Medicago sativa* L. var. Nitro) and four N rates (10, 60, 120 or 180 kg ha^{-1}) on grain % moisture at harvest, grain and stover yield and harvest index (HI) was studied during three growing seasons from 1992 through 1994 at two sites in the province of Quebec (Canada), on a Rivière du Loup sandy loam soil (humo-ferric Podzol) and a Kamouraska clay (humic Gleysol). Northrup King 0565, Pioneer 3979 and Pioneer 3962 corn hybrids were studied. Response to N fertilizer was hybrid-dependent and was affected by the first-year crop in the rotation. The contribution of alfalfa to corn yields was larger at lower N rates in the first year, and very limited in the second year. Increased grain yields due to preceeding alfalfa ranged from 15 to 37 % in 1993 and from 4 to 6 % in 1994. Rotation effects other than apparent N effects accounted for up to 8 % in 1993 and 6 % in 1994. Optimal N levels for grain and stover production in both years ranged from 0 to 122 kg N ha^{-1} with preceeding alfalfa and from 83 to 115 kg N ha^{-1} with preceeding corn. HI and grain % moisture at harvest were mainly affected by hybrid differences. Significant interactions between N levels, hybrids and first-year crop for all yield parameters indicate that in short growing seasons, corn response to N is influenced by hybrid genetic background and previous legume crop.

Introduction

Grain corn (*Zea mays*, L.) production is increasing in Eastern Canada, particularly in areas of limited corn heat units (CHU) accumulation. However, growing corn continuously with high nitrogen (N) rates has been identified as a major source of soil degradation and groundwater contamination by nitrates in the province of Quebec (Grimard, 1990; Tabi et al., 1990). There is a need for better management of cultural factors affecting corn N response.

Cropping factors affecting corn response to fertilizer N include the previous crop, corn hybrid and the interactions among these factors. Nitrogen fertilizer x hybrid interactions are often observed. Higher N fertilizer rates are often required for optimal grain yields of higher yielding hybrids compared to hybrids with low yield potential (Brown, 1986; Carlone and Russel, 1987). Other studies have not reported any genetic dependence of corn response to N (Bundy and Carter, 1988; Gardner et al., 1990).

Increases in cereal yields are often observed after legume crops (Fox and Piekielek, 1988; Peterson and Russelle, 1991). Alfalfa (*Medicago sativa* L.) is particularly efficient in increasing yields of subsequent corn (Harris and Hesterman, 1990). This yield increase is often attributed to the N input of the legume crop into the system (Senaratne and Hardarson, 1988). This N input however affects response to fertilizer N in rotations.

Yield response to N fertilizer is often limited following a legume crop (Baldock et al., 1981; Paré et al., 1992). In a study of residual effects of previous soybean (*Glycine max* [L.] Merr.) and faba bean (*Vicia faba* L.) on succeeding forage-corn in Eastern Quebec, Paré et al. (1992, 1993) observed that forage-corn yields were lower with soybean compared to faba bean as preceding crop. The N rotation effects on subsequent corn were similar whether legumes were grown for one or two years.

Corn yield data following a single-year of alfalfa are not available in Quebec, although alfalfa remains one of the major forage crop in the province. Short rotations of corn with alfalfa grown as an annual crop may be of interest in Quebec due to survival problems of alfalfa stands after winter (Paquin et al., 1987) and due to potential alfalfa contribution to the yield of succeeding corn in the rotation (Harris and Hesterman, 1990).

When alfalfa is included in the rotation, N fertilization of corn should be revised to avoid excess N in the environment (Kurtz et al., 1984). The Conseil des Productions Végétales du Québec (CPVQ Inc., 1994) recommends a credit of 40 to 70 kg N ha⁻¹ for previous alfalfa roots plowdown, but these recommendations are not derived from local experimentation. Adjusting fertilizer N to account for previous legumes may be important in areas with cool and humid climates where the probability of adverse weather conditions is particularly high. Unfavorable weather and cropping practices may affect grain maturity (White, 1978).

Maturity in corn is commonly determined by grain moisture at harvest. This is important in areas where grain corn of high moisture content may result in storage problems or high cost from artificial drying. The use of corn for dry grain, grain silo or silage is determined by its moisture content at harvest (Aldrich et al., 1986).

Harvest index (HI), defined as the ratio of grain yield to aboveground dry matter yield was proposed by Donald (1962). The utility of this concept in the context of agronomic and breeding efforts for increasing crop yields has been reviewed (Donald and Hamblin, 1976). Donald and Hamblin (1976) postulated that reporting HI with yields would allow far more analytical interpretation of genotypic and environmental effects than is possible from grain yield alone.

Although more than 300 000 ha are devoted to corn production in Quebec (Filion, 1996), very little information is available on rotation and N fertilization response of early

maturing corn hybrids. Also, many studies on corn ear moisture have been published but few contained data on the effects of nitrogen and a preceding culture of legume or grain moisture at harvest. The objective of this study was to study the influence of N fertilizer, corn hybrid type and nondormant alfalfa use on the yield parameters of corn grown on a sandy loam and a clay in an area of 2300 - 2500 CHU accumulation in eastern Quebec.

MATERIALS AND METHODS

Field experiments were conducted from 1992 through 1994 in Eastern Quebec at Saint-Anselme (latitude 46° 36'; longitude 70° 58'; altitude 600 m) on a Rivière-du-Loup sandy loam (coarse loamy, mixed, frigid Typic Haplorthod) and at Saint-Nicolas (latitude 46° 41'; longitude 71° 25'; altitude 72 m) on a Kamouraska clay (fine, mixed, frigid Typic Humaquept).

Some of the initial soil properties are indicated in Table 2.1. The soil pH was measured in water (McKeague, 1978). Phosphorus was determined by colorimetry after extraction by the Mehlich III solution (Tran and Simard, 1993). Potassium, Ca and Mg were determined by atomic absorption spectrophotometry (Tran and Simard, 1993). Soil organic matter was estimated by the Walkley and Black modified method (McKeague, 1978). The amounts of seasonal precipitations and CHU during the experimental period at both sites, from the planting date in 1992 and from March to October the following years, are indicated in Table 2.2.

In 1992, the experimental design was a split plot with N rates as main plot factor and hybrids as subplot factor. In 1993 and 1994, the experimental design was a split-split-plot with the first-year crop (corn or alfalfa) as the sub-sub-plot factor. At each site, the experiment comprised four replicates. Experimental plots were 5 m long and 6 m wide.

On each site in 1992, twelve of the experimental plots per block were seeded with non dormant alfalfa (*Medicago sativa* L. var. Nitro) and another twelve with three corn (*Zea mays* L.) hybrids : four were seeded with hybrid Northrup King 0565 (NK0565), four with Pioneer 3979 (P3979) and four with Pioneer 3962 (P3962). Their corn heat units (CHU) ratings are estimated at 2300, 2325 and 2500, respectively. One plot per block was seeded with bromegrass (*Bromis inermis* var. Saratoga). Bromegrass served as reference crop for alfalfa in 1992 in a concurrent N₂ fixation study. During the subsequent years, bromegrass plots were fallowed. Alfalfa plots were next to corn plots in 1992. In 1993 and 1994, all plots were planted with corn hybrids and corn monoculture could be compared to corn following one-year alfalfa.

Prior to planting in 1992 on the sandy loam, Primextra (metolachlore 300 g L⁻¹ + atrazine 200 g L⁻¹) was used as pre-emergence herbicide on corn plots at 8.5 L ha⁻¹ while Embutox (1.5 L ha⁻¹) and MCPA amine 500 (0.07 L ha⁻¹) were used on alfalfa plots. On the clay soil, Round Up (glyphosate) was used before planting at 4 L ha⁻¹. In 1993 and 1994, Laddock (3.5 L ha⁻¹) and Assist (2.5 L ha⁻¹) were used at both sites as pre-emergence herbicides.

Alfalfa var. Nitro and bromegrass var. Saratoga were sown on May 16, 1992 on the sandy loam and on May 23, 1992 on the clay soil. Alfalfa (89% germination) and bromegrass (91% germination) were seeded at the rates of 14.6 and 18.7 kg ha⁻¹ respectively. Each plot of alfalfa and bromegrass comprised 40 rows spaced at 0.15 m. Alfalfa seeds were inoculated at seeding with the Nitragin[®] Pelinoc[®] forage inoculant (Liphatech Inc, Milwaukee, WI) containing the strain Balsac of *Rhizobium meliloti*. In 1992 after seedling emergence, micro-plots 1.00 m x 0.76 m were delimited within alfalfa plots and received labelled ¹⁵NH₄⁺ and ¹⁵NO₃⁻ for subsequent N₂ fixation studies.

On the sandy loam, corn was sown on May 15 in 1992 and 1994, and May 23 in 1993. On the clay soil, sowing dates were May 23, May 31 and May 19 respectively. Each corn

plot consisted of eight rows spaced 0.75 m apart, and within-row spacing was 0.20 m. In all years, after seedling emergence, micro-plots 2.6 m x 2.25 m were delimited in all corn plots and these received ^{15}N -depleted ammonium nitrate ($^{14}\text{NH}_4^{14}\text{NO}_3$) for subsequent N isotopic studies.

Each year, P and K fertilizers were applied prior to planting according to soil tests and local recommendations (CPVQ, 1989). The N rates used in corn plots were 10, 60, 120 or 180 kg ha⁻¹. The rate 10 kg N ha⁻¹ was used because ^{15}N tracer was needed in the study of N transfer from alfalfa to subsequent corn crops. The N fertilizer was banded in corn plots twice as NH_4NO_3 . One fraction (10 or 25 kg N ha⁻¹) was applied after seedling emergence and the other fraction (0, 35, 95 or 145 kg N ha⁻¹) at the six- to eight-leaf stage (tassel initiation). An amount of 10 kg N ha⁻¹ was broadcasted in alfalfa and bromegrass plots.

Alfalfa and bromegrass were harvested twice with a forage hand harvester. Harvest dates were August 7, 1992 and October 6, 1992 on the sandy loam and August 17, 1992 and October 7, 1992 on the clay soil. Yields were estimated from a sample taken in plot centers through their whole 6 m width. The harvester was set at 8 cm height and it allowed a harvest width of 63 cm. On each harvest, a sample of 500 to 600 g was taken for yield estimation. After the second harvest, the roots, crowns and early-fall regrowth were incorporated with a moldboard plow.

Corn was harvested on October 27 on the sandy loam and October 30 on the clay soil in 1992. In 1993 and 1994, corn harvest dates were October 25 and 26 on the sandy loam, respectively, and October 27 on the clay soil. Three inner rows of corn plots were harvested after ears were hand removed. A sample of about 1 kg fresh weight of grain from each plot was dried at 65 °C and used for grain moisture and dry matter yield determinations. Each year, corn stover residues were incorporated after a sample of about 500 to 600 g was taken in each plot and dried at 65 °C for yield determination.

Harvest index (HI) was determined as the ratio of grain dry weight to total above ground dry matter produced.

Statistical analyses were carried out using SAS procedures (Statistical Analysis System Institute, Inc. 1990). Experimental error variances for each site were tested for homogeneity using Bartlett's test on N rates x hybrids x first-year crop combinations (Steel and Torrie, 1980). Orthogonal contrasts were calculated in 1993 and 1994 following different first-year crops (corn or alfalfa), to determine linear or quadratic trends in corn N response. Regression equations determining the N response of corn were calculated on the basis of orthogonal trend comparisons. Optimal N rates were determined using a quadratic-plateau model (Cerrato and Blackmer, 1990). In 1993 and 1994, rotation effects were estimated as the yield differential between corn in monoculture and corn following alfalfa legume at 180 kg N ha⁻¹ (Baldock et al., 1981). Hybrids NK0565 (2300 CHU) and P3979 (2325 CHU) were chosen due to their similar CHU requirements. Differences between those two hybrids would be mainly due to genetic differences. Hybrids P3979 and P3962 (2500 CHU) were compared and differences would be mainly due to their adaptation to the environment. Combined analyses of variance across sites were performed but due to non homogeneous error variances, results are presented and discussed for each site separately.

RESULTS

During the experimental period, total rainfall was sufficient at both sites for corn growth. Accumulated CHU were lower in 1992 but have slightly exceeded all hybrids requirements in 1993 and 1994 (Table 2.2). Insufficient CHU accumulation in 1992 and especially on the clay soil, did not favor the achievement of crop maturity and corn was harvested with high grain moisture compared to the subsequent years.

Grain moisture content

Differential hybrid responses to rotation were observed. At both sites and in all years, grain percent moisture at harvest of the three corn hybrids was different (Table 2.3; Fig 2.1). The rotation did not influence corn grain moisture at harvest. Grain moisture was affected by N fertilizer rates but the response was year dependent.

Year 1992

At both sites, the grain percent moisture content at harvest of NK0565 was lower than in hybrid P3979 or hybrid P3962 (Table 2.3; Fig. 2.1).

Year 1993

On the sandy loam soil, the grain % moisture at harvest decreased as N rates increased (Table 2.3; Fig. 2.1). As observed in 1992, hybrid NK0565 grain % moisture at harvest was the lowest and that of P3962 was the highest. On the clay soil, the grain % moisture at harvest was slightly lower in the monoculture compared to the rotation for hybrids NK0565 and P3979 but the opposite was observed for hybrid P3962 (H x FYC, Table 2.3; Fig 2.1).

Year 1994

At both sites, as N rate increased, grain % moisture remained fairly constant for hybrid P3962 but decreased for hybrids P3979 and NK0565 (N x H; Table 2.3; Fig 2.1). On the sandy loam soil, the decline in percent grain moisture with N rates was greater for hybrid P3979 than for hybrid NK0565 or hybrid P3962 (N x H; Table 2.3; Fig 2.1). On the clay soil, rates of decrease in percent grain moisture with N rate were similar in hybrids NK0565 and P3979, and greater than that found with hybrid P3962.

Yields

The rotation increased grain and stover yields compared to monoculture for all corn hybrids and sites (Tables 2.4 and 2.5; Figs. 2.3 to 2.6). The magnitude of the yield

response was year-dependent. Differential rotation effects were observed among N rates and hybrids. Yields of all hybrids increased in response to fertilizer N application (Tables 2.4 and 2.5; Figs. 2.2 to 2.6). Differential responses to N were observed among corn hybrids.

Year 1992

At both sites, grain yields increased linearly with N rates (Table 2.4; Fig. 2.2). Grain yield of hybrid P3979 was significantly larger than that of the other hybrids.

Stover yield response to N was similar to grain yield response at both sites but stover yield tended to level off with N rates more rapidly than grain yield on the clay soil (Table 2.5; Fig. 2.2). Stover yield of hybrid P3962 was larger than that of NK0565 or P3979.

Year 1993

At both sites, grain yield was larger in the rotation compared to corn monoculture and the increase in grain yield due to preceding alfalfa was larger at low compared to high N rates (N x FYC, Table 2.4; Fig. 2.3). The effect of previous alfalfa on grain yield was generally present even at high N levels in plots planted with P3979 and P3962 (Fig. 2.3). There were greater increases in grain yield due to previous alfalfa for hybrid P3979 compared to hybrid NK0565 on the sandy loam soil, but both hybrids responded similarly to previous alfalfa on the clay soil (Table 2.4; Fig. 2.3). On the clay soil, hybrid P3962 showed a greater yield increase due to previous alfalfa at the lower N rates compared to the other hybrids (Table 2.4; Fig. 2.3).

On the sandy loam soil, the rotation also increased stover yields compared to corn monoculture. The increase in stover yield due to rotation was larger at the lower N rates (N x FYC, Table 2.5; Fig. 2.4).

On the clay soil, corn stover yields were larger when the preceding crop was alfalfa at all N levels except for hybrid P3962 when 120 kg N ha⁻¹ were applied (N x H x FYC,

Table 2.5; Fig. 2.4). Equations describing grain yield responses to N indicate that optimal N rates for grain production were lower after alfalfa compared to corn monoculture for NK0565 and P3962 (Table 2.6).

Year 1994

On the sandy loam soil, grain yield response to N was similar for hybrids NK0565 and P3979, and greater than that of hybrid P3962 (N x H, Table 2.4; Fig 2.5). On the clay soil, grain yield increased with N rates but this response to fertilizer N tended to level off between 120 and 180 kg N ha⁻¹ (Table 2.4; Fig. 2.5). Hybrid P3979 generally produced more grain than NK0565 (H, Table 2.4; Fig. 2.5) and grain yield reached a plateau at 120 kg N ha⁻¹ for P3979, but not for NK0565 (N_Q x (NK0565 vs P3979); Table 2.4; Fig. 2.5).

At both sites, stover yields increased in response to N fertilization but this increase tended to level off at high N rates (N_Q, Table 2.5; Fig. 2.6). Differences occurred among hybrids for stover yields at both sites (H, Table 2.5; Fig. 2.6). Hybrids NK0565 and P3979 had similar stover yields but these were lower compared to that of hybrid P3962.

At both sites, two years after alfalfa, the rotation still increased corn grain and stover yields compared to corn monoculture (Table 2.4; Fig. 2.5). The response to fertilizer N was predominantly linear on the sandy loam soil and quadratic on the clay soil (Table 2.6). In general, optimal N rates obtained in 1994 were larger than those obtained in 1993 (Table 2.6).

Harvest index

At both sites, harvest index (HI) response to the rotation was observed and was year dependent (Table 2.7; Fig. 2.7). The effects of N on HI were significant on the sandy loam but not on the clay soil. Differences in hybrid HI were observed.

Year 1992

At both sites, harvest index (HI) of hybrid P3979 was larger than that of the other hybrids. Hybrid P3979 was followed by hybrid NK0565 and then hybrid P3962 (Table 2.7; Fig. 2.7).

Year 1993

On the sandy loam, HI increased with fertilizer N (Table 2.7; Fig. 2.7). The HI of hybrid P3979 was larger compared to that of the other hybrids. On the clay soil, hybrids P3979 and NK0565 had similar HI, and were larger compared to that of P3962.

Year 1994

On the sandy loam soil, the HI increased with N rates for hybrids P3979 and NK0565 but not for hybrid P3962 (N X H, Table 2.7; Fig 2.8). At both sites, HI were larger in plots with alfalfa as first-year crop. On the sandy loam soil, the HI of P3979 was higher than that of other hybrids. On the clay soil, hybrids P3979 and NK0565 had similar HI, and HI of hybrid P3979 was significantly larger compared to that of hybrid P3962.

DISCUSSION

Hybrid P3962, which had the highest percent grain moisture at harvest and the lowest harvest index (HI) of all three hybrids was the least adapted to our experimental conditions. Our results agree with the CHU rating of the three hybrids. Consistently, the % grain moisture at harvest of hybrid NK0565 was the lowest, followed by P3979. Major et al. (1991) reported that hybrids must be rated at about 250 growing degree days (GDD) less for a given area to mature reliably before killing frosts in the fall (a direct relationship is not available between GDD and CHU systems).

Explaining corn moisture loss in the field has been recognized difficult because the numerous factors that affect drying are confounded (Cross and Kabir, 1989). These

factors include length of phenological stages (Major and Hamilton, 1978) loose husks (Troyer and Ambrose, 1971), grain characteristics (Troyer and Ambrose, 1971), premature plant death (Troyer and Ambrose, 1971), nutrient supply (Aldrich et al., 1975), grain water content at physiological maturity (Cross and Kabir, 1989) and crop rotations (Peterson and Varvel, 1989).

Most of the genotypic differences among hybrids in overall maturity rating are often assigned to the period from emergence to anthesis (Major and Hamilton, 1978). Faster drying rates were associated with thinner pericarps and greater permeability (Troyer and Ambrose, 1971). The results of our experiment indicate that NK0565 dried faster and had a shorter duration of the period between emergence and anthesis. Based on percent grain moisture at harvest, it can be concluded that hybrid P3962 was not suited for grain production at both sites. In contrast, hybrids NK0565 and P3979 may be grown for dry grain, high moisture grain or silage depending on the year and site. However, drying cost may be larger for hybrid P3979.

In general, grain moisture at harvest was little affected by the first-year crop in the rotation. In contrast, Peterson and Varvel (1989) observed that corn moisture content at maturity was affected by rotation in two of their three experimental years. Continuous corn had larger moisture content (590 g kg^{-1}) than corn in rotation (520 g kg^{-1}). They suggested that corn development on the continuous corn plots lagged behind corn in the rotation.

Grain moisture content was inversely related to N rates. This decrease in grain moisture was hybrid dependent. The adapted hybrids (Northrup King 0565 and Pioneer 3979) had lower percent grain moisture at harvest when the N level increased but percent grain moisture of P3962 was little affected by N rate. This suggests that limitations due to the environment were more effective than N effects. Sufficient soil and fertilizer N favored plant growth and development relative to N depleted plants and this may have

resulted in hastening maturity (Aldrich et al. 1975). Chakor and Awasthi (1985) also observed N x H interaction for corn grain moisture at harvest. In contrast however, grain moisture increased with N rates and this increase was affected by hybrids at all harvest dates. This contrary effect of N may have been due to a limitation of other nutrients (Aldrich et al., 1975).

The linear response to N fertilizer in 1992 at both sites and the relative importance of the linear response component in 1993 and 1994 on the sandy loam soil tend to confirm the high N levels previously recommended for corn production in Quebec. Our yield data indicate that on the sandy loam soil, the N rate for maximum grain yield may be much larger than 180 kg N ha⁻¹. Recently, Liang and Mackenzie (1994) observed that maximum yields were obtained with 300 to 350 kg N ha⁻¹ on a Chicot sandy clay loam (Grey Brown Luvisol). However, large amounts of N fertilizer were not recovered by the crop and were presumably lost through leaching or denitrification, and thus causing an environmental hazard and an economic loss.

Corn hybrids responded to N fertilization but low spring temperatures and relatively low CHU accumulation may have contributed to limit the expression of corn hybrids yield potential. Other studies in Canada have indicated that under cool climates, the use of high N rates though slightly improving yields, would not be economical. Limiting factors related to hybrid yield potential, soil and climate are important (White, 1978; Tran, 1994; Isfan et al., 1995). On the clay soil, N rates for grain-corn production may not exceed 120 kg ha⁻¹.

The N x H interaction for grain and stover yields indicated different hybrid N fertilizer requirements. A better adaptation to the environment resulted in higher yields of hybrids P3979 and NK0565 compared to P3962. Interactions between N rates and corn hybrids have been found in several studies. In southern Ontario (Canada), Brown (1986) observed differences in hybrid response to N in two of the five experimental years. More

N fertilizer was required for optimal grain yield of higher yielding hybrids. Significant hybrid x N rate interactions were also found by Carlone and Russel (1987). They observed instances of two hybrids with one common parental line having significantly different response to N. In contrast, Bundy and Carter (1988) found no differences to N responses among five hybrids in Wisconsin. Similar results were obtained by Gardner et al. (1990) in the U.S. Corn Belt and they recommended a single N fertilizer program for all hybrids. The absence of genetic influence on the response to N was attributed to similar N requirements of hybrids, to unsatisfactory environments limiting yields, or to high residual soil N limiting N fertilizer response (Albus and Moraghan, 1995).

The significant N x FYC interactions translated into larger impact of preceding alfalfa on corn yields at lower N levels compared to higher N rates. Paré et al. (1993) however found a synergistic relationship between two consecutive years of soybean and N fertilizer for forage corn production. Forage corn yields following soybean were larger with applied N (50, 100 or 150 kg N ha⁻¹) compared to corn in monoculture receiving the same amounts of N. The H x FYC interactions on the sandy loam soil for grain yields were mainly expressed with hybrid P3979 taking more advantage of N resulting from preceding alfalfa compared to hybrids NK0565 and P3962.

The lower N effect on corn yields in the rotation compared to continuous corn can be attributable in part, to a more significant N contribution from alfalfa compared to corn residues. Limited corn response to applied N when corn follows legumes in rotation has been documented (Baldock et al., 1981; Bruuslema, and Christie, 1987, Fox and Piekielek, 1988). Other studies have indicated that legumes have a beneficial effect on the yields of succeeding cereals (Senaratne and Hardarson, 1988; Danso and Papastylianou, 1992; Paré et al., 1993). The magnitude of yield increase of the subsequent crop was related to the amount of material returned to the soil (Heichel, 1987).

In our study, alfalfa above-ground parts were removed and differences in N contribution to soil N should be due to differences in N released from mineralization of alfalfa var. Nitro residues. This non dormant alfalfa selected for larger roots and increased N concentration in roots may be a better alternative for use in short rotations compared to traditional dormant and semi-dormant alfalfas (Sheaffer et al., 1991). Alfalfa var. Nitro produced significantly more herbage for soil incorporation in the fall relative to the dormant alfalfa cultivars in Manitoba (Kelner and Vessey, 1995). But, harvest management may be the key factor determining legume impact on yields of subsequent crops (Sheaffer et al., 1991).

Evidence of rotation effects other than N effects (Baldock et al., 1981) were found. Fox and Piekielek (1988) observed a comparable previous crop effect in the first year following alfalfa only. This was attributable to corn taking more N from the soil after alfalfa. Luxury consumption of N after legumes has been reported (Peterson and Russelle, 1991).

Our results compare well with those of other researchers who observed increased dry matter yields of corn following legumes. Senaratne and Hardarson (1988) observed increased DMY of sorghum (*Sorghum vulgare* L.) and barley (*Hordeum vulgare* L.) following incorporation of faba bean and pea (*Pisum sativum* L.). The N benefit to subsequent crops after legumes was attributed to a lower uptake of soil N by previous legumes relative to previous cereals (the "N sparing " or "N conserving effect"), and a carry-over from the legume residue, both resulting in larger uptake of soil N by the subsequent crops compared to crops grown after non-legumes (Senaratne and Hardarson, 1988). These results are consistent with those of Hesterman et al. (1986) and Paré et al. (1993) who reported increased corn yields from rotations compared to a continuous corn system. However, legume plow down is not always beneficial to subsequent crops. Nil or negative effects of legume plowdown on subsequent crops have been reported when native soil N was high or in the case of grain legumes exporting more N than forage species (Danso and Papastylianou, 1992).

Our results indicate that harvest index (HI) was influenced by hybrid differences, N supply and rotation. Harvest index (HI) of earlier hybrid (P3979) was larger compared to later hybrid (P3962). Among our earliest hybrids, P3979 had larger HI compared to NK0565. We hypothesize that under short growing seasons, early hybrids complete their dry matter partitioning to the grain while late hybrids do not before the first killing frosts. Dwyer et al. (1994) also observed differences in HI among corn hybrids maturity groups. In contrast to our results, they observed significant higher HI in the late hybrid group compared to early and intermediate groups, although they had a shorter grain filling period. This result was explained by greater investment in time to silking, faster rates of grain dry down and faster rates of filling in late hybrids which contributed to high yields in these hybrids. However, Prihar and Stewart (1990) observed that intercultural comparisons for HI is difficult because several environmental and cultural factors affect HI. Thus stress tolerance of cultivars may differ and intercultural and interspecies comparisons should be based on genetic HI determined under stress-free conditions.

The higher the N supply, the larger the HI in our experiment. Increased N supply with high N rates may have hasten corn maturity and dry matter partitioning. This may be particularly important under short growing seasons. Aldrich et al. (1985) reported that applying NPK hastens corn maturity from a few days to about one week and that the greater the growth and yield response to the nutrient, the more the maturity is hastened. Stockle and Campbell (1985) have also demonstrated that nutrient availability is an important factor affecting crop HI. The higher HI in the rotation compared to monoculture may not be mainly related to N effects because differences occurred in 1994 rather than in 1993. In 1994 N from mineralization of alfalfa residues was exhausted. Corn growth in monoculture may lag behind corn growth in rotation.

Conclusions

Hybrids NK0565 and P3979 were the most adapted cultivars for grain production. They yielded more grain compared to P3962 and had lower % grain moisture at harvest. Hybrid P3962 however produced larger stover yields and may be a better alternative as a forage crop. Yields were larger on the sandy loam soil compared to the clay soil.

Our results suggest that fertilizer N recommendations should be site specific. Corn behavior was less satisfactory on the clay soil compared to the sandy loam soil. The northern clay site was not favored by late planting and CHU accumulation. Fertilizer N recommendations should not ignore the genotype as differential hybrids response to N were observed.

The results of this study have also indicated important hybrid differences in yields (grain and stover), harvest index (HI) and grain % moisture at harvest. Continuous corn produced less grain and stover yields compared to corn in the rotation. Corn following alfalfa required less fertilizer N than continuous corn for optimal yield. However, the results indicate that factors other than nutrient supply affected corn yield. Short season corn may be grown satisfactorily with 120 kg N ha⁻¹ although larger fertilizer N levels may slightly improve yields. This N rate is at the lower limit of the interval recommended by the CPVQ for corn production and should be lowered with legume N contribution.

Corn rotations with alfalfa grown and harvested during the seeding year is an interesting alternative to continuous corn given its contribution to the yield of subsequent corn and considering the problems of soil structure degradation associated with corn monoculture in Quebec and the important corn N needs.

Table 2.1. Selected soil properties at Saint-Anselme on the sandy loam soil and at Saint-Nicolas on the clay soil in the 0-30 cm soil layer prior to crop establishment in 1992.

Locations	Texture	Clay (%)	Sand (%)	pH ^z	O.M. ^y g kg ⁻¹	P	K	Ca	Mg
..... (mg kg ⁻¹)									
Saint-Anselme	Sandy loam	19.3	62.9	6.9	29.1	74	108	1727	47
Saint-Nicolas	Clay	43.6	47.2	6.1	36.0	33	158	1594	101

^z : pH in soil:water ratio 1:2

^y : Organic matter

P, K, Ca and Mg in Mehlich III extracts

Table 2.2. Accumulated rainfall (mm) and corn heat units (CHU) from seeding to October in 1992 and from May to October in 1993 and 1994 near Saint-Anselme (Scott-Jonction) and near Saint-Nicolas (Quebec City).

Location	Rainfall (mm)			Accumulated CHU		
	1992	1993	1994	1992	1993	1994
Quebec City	580	751	710	2241	2592	2656
Scott-Jonction ^z	479	798	601	2419	2545	2575

^z In 1994, data are from the Saint-Michel-de-Bellechasse weather station

Table 2.3. Summary of the analyses of variance for corn grain % moisture at harvest on the sandy loam soil (at Saint-Anselme) and on the clay soil (at Saint-Nicolas) in 1992, 1993 and 1994.

Sources of variation	df	Sandy loam soil			Clay soil		
		1992	1993	1994	1992	1993	1994
Rep ^z	3	66.21	24.35	34.69	1.79	2.84	15.85
Nitrogen (N)	3	35.79	63.44 *	105.06 *	17.35	7.71	69.91 **
N _L ^y	1	25.78	110.84 ***	288.51 **	8.33	1.06	199.26 ***
N _C ^x	1	29.89	30.18	5.17	36.53	19.15	9.96
Error (a)	9	25.57	21.08	16.72	16.61	15.29	6.41
Hybrids (H)	2	573.71 ***	1109 ***	1095.28 ***	332.61 ***	894.88 ***	534 ***
NK0565 ^w vs P3979 ^v	1	71.4 ***	89.14 ***	440.89 ***	101.17 **	585.22 ***	343.41 ***
P3979 vs P3962 ^u	1	584.82 ***	1241.68 ***	661.84 ***	241.45 ***	322.61 ***	197.3 ***
N x H	6	5.33	2.84	13.65 *	18.04	0.43	10.99 *
N _L x (NK0565 vs P3979)	1	2.72	6.22	24.6 *	0.29	0.81	17.97
N _L x (P3979 vs P3962)	1	7.08	5.95	48.54 **	3.61	0.01	30.18 *
N _C x (NK0565 vs P3979)	1	14.94	0.11	17.89	45.79 *	0.01	22.86 *
N _C x (P3979 vs P3962)	1	0.09	4.25	22.57 *	2.49	0.18	10.51
Error (b)	24	4.72	6.18	4.42	9.92	1.88	4.26
First-year Crop (FYC)	1		10.46	0.04		0.01	4.83
N x FYC	3		5.51	1.39		2.88	3.11
H x FYC	2		2.78	1.82		8.48 **	2.09
N x H x FYC	6		1.42	2.97		0.89	1.60
Error (c)	36		5.19	1.35		1.47	2.04

..... mean squares

^z Replicates

^{x, y} : Linear and quadratic effect of N

^{w, v} and ^u : Northrup King 0565, Pioneer 3979 and Pioneer 3962

*, **, *** : Significant at the 0.05, 0.01 and 0.001 probability levels respectively.

Table 2.4. Summary of the analyses of variance for corn grain yields on the sandy loam soil (at Saint-Anselme) and on the clay soil (at Saint-Nicolas) in 1992, 1993 and 1994.

Sources of variation	df	Sandy loam soil			Clay soil		
		1992	1993	1994	1992	1993	1994
----- mean squares (x10 ³) -----							
Rep ^z	3	236	328	191	146	605 *	299
Nitrogen (N)	3	6453 **	13711 ***	47622 ***	1838 **	6968 ***	54411 ***
N _L ^y	1	17984 ***	39546 ***	140232 ***	5025 ***	13454 ***	141365 ***
N _Q ^x	1	402	607	2601 **	368	6916 ***	21324 ***
Error (a)	9	557	625	227	211	148	243
Hybrids (H)	2	3983 ***	2264 ***	2107 ***	1648 ***	111	982 *
NK0565 ^w vs P3979 ^v	1	6909 ***	4294 ***	2395 ***	2355 ***	221	1963 **
P3979 vs P3962 ^u	1	4859 ***	380	3771 ***	2585 ***	76	525
N x H	6	198	134	351 *	43	195	490
N _L x (NK0565 vs P3979)	1	368	1.37	151	1.46	381	325
N _L x (P3979 vs P3962)	1	450	132	1661 **	0.09	91	92
N _Q x (NK0565 vs P3979)	1	14	28.5	183	106	547	1403 *
N _Q x (P3979 vs P3962)	1	348	2.8	292	4.86	241	13
Error (b)	24	146	226	121	139	133	244
Previous Crop (FYC)	1		14004 ***	1998 ***		4144 ***	2636 ***
N x FYC	3		3193 ***	79		1288 ***	211 *
N _L x FYC	1		7696 ***	37		3062 ***	7.61
N _Q x FYC	1		1683 ***	201		738 **	124
H x FYC	2		393 *	13		315 *	34
(NK0565 vs P3979) x FYC	1		769 **	25		0.36	56
(P3979 vs P3962) x FYC	1		102	12		460 *	45
N x H x FYC	6		147	53		219	165
Error (c)	36		102	49		95	71

^z Replicates

^{x, y} : Linear and quadratic effect of N

^{w, v, u} : Northrup King 0565, Pioneer 3979 and Pioneer 3962

*, **, *** : Significant at the 0.05, 0.01 and 0.001 probability levels respectively.

Table 2.5. Summary of the analyses of variance for corn stover yields on the sandy loam soil (at Saint-Anselme) and on the clay soil (at Saint-Nicolas) in 1992, 1993 and 1994.

Sources of variation	df	Sandy loam soil			Clay soil		
		1992	1993	1994	1992	1993	1994
----- mean squares (x10 ³) -----							
Rep ^z	3	3526	273	351	2847	253	49
Nitrogen (N)	3	12014 **	5351 ***	26161 ***	13812 ***	4317 ***	41083 ***
N _L ^y	1	35055 ***	14474 ***	69536 ***	26106 ***	8371 ***	96962 ***
N _Q ^x	1	537	1558 *	8941 ***	11890 **	3224 **	23629 ***
Error (a)	9	1147	229	310	955	280	309
Hybrids (H)	2	6657 ***	8945 ***	3492 ***	10307 ***	5770 ***	6722 ***
NK0565 ^w vs P3979 ^v	1	0.11	37	2.18	118	1036 *	792
P3979 vs P3962 ^u	1	10017 ***	14103 ***	5159 ***	16750 ***	10994 ***	6945 ***
N x H	6	420	524 **	327	965	430 *	353
N _L x (NK0565 vs P3979)	1	155	1568 **	208	1913	991 *	15
N _L x (P3979 vs P3962)	1	253	1146 **	385	1142	345	339
N _Q x (P3979 vs P3962)	1	0.83	764 *	986 *	28	246	536
Error (b)	24	594	131	182	764	138	189
Previous Crop (FYC)	1		18844 ***	922 ***		6373 ***	272 *
N x FYC	3		4394 ***	24		1467 ***	58
N _L x FYC	1		11555 ***	0.01		4191 ***	145
N _Q x FYC	1		1624 **	63		204	2.5
H x FYC	2		217	88		72	51
N x H x FYC	6		293	102		492 ***	82
Error (c)	36		142	53		92	65

^z Replicates

^{x, y} : Linear and quadratic effect of N

^{w, v, and u} : Northrup King 0565, Pioneer 3979 and Pioneer 3962

*, **, *** : Significant at the 0.05, 0.01 and 0.001 probability levels respectively.

Table 2.6. Regression equations for grain and stover yields (Y) as a function of N rate (N) on the sandy loam soil (at Saint-Anselme) and on the clay soil (at Saint-Nicolas) in 1993 and 1994.

Hybrid	Plant fraction	1st-year crop	1993		1994			
			Equations	No* (kg ha ⁻¹)	R ²	Equations	No* (kg ha ⁻¹)	R ²
Sandy loam soil								
NK0565	Grain	Corn	Y = 3447.9 + 15.14 N	n.e.**	0.98	Y = 2746.3 + 19.41 N	n.e.	0.99
	Grain	Alfalfa	Y = 4983.1 + 4.22 N	n.e.	0.87	Y = 2663.0 + 12.82 N	n.e.	0.98
	Stover	Corn	Y = 3389.6 + 28.07 N + 0.085 N ²	161	0.95	Y = 2898.9 + 26.61 N	n.e.	0.99
	Stover	Alfalfa	Y = 5349.1 + 4.09 N	n.e.	0.68	Y = 2840.5 + 33.18 N + 0.099 N ²	163	0.99
P3979	Grain	Corn	Y = 3375.9 + 33.32 N	n.e.	0.98	Y = 2924.6 + 21.24 N	n.e.	0.97
	Grain	Alfalfa	Y = 5611.8 + 5.39 N	n.e.	0.87	Y = 3277.0 + 21.03 N	n.e.	0.95
	Stover	Corn	Y = 3981.9 + 8.15 N	n.e.	0.95	Y = 3064.0 + 21.73 N + 0.043 N ²	n.e.	0.99
	Stover	Alfalfa	Y = 5996.5 - 2.04 N	n.e.	0.45	Y = 3238.6 + 26.31 N + 0.083 N ²	151	0.99
P3962	Grain	Corn	Y = 3716.1 + 14.67 N	n.e.	0.87	Y = 2849.1 + 17.11 N	n.e.	0.99
	Grain	Alfalfa	Y = 5206.0 + 7.25 N	n.e.	0.91	Y = 3315.9 + 15.07 N	n.e.	0.96
	Stover	Corn	Y = 3852.3 + 38.23 N - 0.124 N ²	146	0.99	Y = 2984.3 + 42.41 N + 0.152 N ²	134	0.99
	Stover	Alfalfa	Y = 6499.2 + 3.92 N - 0.021 N ²	45	0.97	Y = 3213.2 + 40.51 N + 0.132 N ²	n.e.	0.99
Clay soil								
NK0565	Grain	Corn	Y = 3388.7 + 41.41 N - 0.201 N ²	103	0.96	Y = 3694.4 + 18.84 N	n.e.	0.97
	Grain	Alfalfa	Y = 4249.8 + 31.78 N - 0.191 N ²	83	0.99	Y = 3639.8 + 39.81 N - 0.119 N ²	159	0.98
	Stover	Corn	Y = 4200.2 + 11.26 N - 0.016 N ²	n.e.	0.94	Y = 2195.5 + 45.55 N - 0.161 N ²	110	0.98
	Stover	Alfalfa	Y = 4664.0 + 19.06 N - 0.075 N ²	130	0.95	Y = 2563.6 + 39.04 N - 0.128 N ²	140	0.99
P3979	Grain	Corn	Y = 3877.0 + 23.49 N - 0.102 N ²	115	0.99	Y = 3306.8 + 49.49 N - 0.164 N ²	151	0.99
	Grain	Alfalfa	Y = 4709.1 + 10.57 N - 0.043 N ²	122	0.99	Y = 2969.6 + 68.01 N - 0.263 N ²	129	0.99
	Stover	Corn	Y = 3815.0 + 20.22 N - 0.073 N ²	83	0.91	Y = 2625.3 + 37.76 N - 0.114 N ²	161	0.99
	Stover	Alfalfa	Y = 5271.4 + 1.937 N - 0.016 N ²	0	0.92	Y = 2593.2 + 43.83 N - 0.154 N ²	105	0.97
P3962	Grain	Corn	Y = 3032.7 + 42.06 N - 0.188 N ²	112	0.99	Y = 2613.2 + 73.84 N - 0.337 N ²	110	0.97
	Grain	Alfalfa	Y = 4787.2 + 28.67 N - 0.274 N ²	52	0.95	Y = 3163.6 + 65.94 N - 0.283 N ²	116	0.97
	Stover	Corn	Y = 4019.6 + 33.82 N - 0.129 N ²	94	0.97	Y = 2580.1 + 56.68 N - 0.201 N ²	99	0.96
	Stover	Alfalfa	Y = 5903.5 + 7.94 N - 0.039 N ²	51	0.76	Y = 2951.0 + 51.63 N - 0.184 N ²	88	0.93

*: Amount of N needed to reach optimal yield

** : Not estimable due to linear response to N or optimal N rate out of range.

Table 2.7. Summary of the analyses of variance for corn harvest index on the sandy loam soil (at Saint-Anselme) and on the clay soil (at Saint-Nicolas) in 1992, 1993 and 1994.

Sources of variation	df	Sandy loam soil			Clay soil		
		1992	1993	1994	1992	1993	1994
----- mean squares -----							
Rep ^z	3	31.54	19.77	9.46	11.86	12.89	2.12
Nitrogen (N)	3	11.54	53.69 *	121.14 **	23.31	18.09	24.63
N _L ^y	1	22.15	144.67 ***	344.39 ***	4.85	25.08	1.57
N _Q ^x	1	0.06	0.13	17.02	52.84 *	27.91	40.19 *
Error (a)	9	18.09	13.81	11.79	7.34	6.22	8.29
Hybrids (H)	2	310.68 ***	189.68 ***	197.47 ***	260.71 ***	116.71 ***	163.35 ***
NK0565 ^w vs P3979 ^v	1	251 ***	111.04 **	50.41 **	104.83 **	8.93	0.01
P3979 vs P3962 ^u	1	604 ***	378.49 ***	385.14 ***	520 ***	209.38 ***	244.45 ***
N x H	6	13.62	11.46	20.15 **	12.29	4.10	8.53
N _L x (NK0565 vs P3979)	1	7.81	23.02	10.32	28.33	0.80	9.42
N _L x (P3979 vs P3962)	1	10.53	4.43	51.14 **	1.79	0.03	2.11
N _Q x (NK0565 vs P3979)	1	5.56	12.38	14.71	9.89	14.93	41.14 *
N _Q x (P3979 vs P3962)	1	11.92	13.44	64.1 ***	0.01	1.17	6.70
Error (b)	24	13.06	7.97	4.35	7.95	3.57	7.57
Previous Crop (FYC)	1		2.96	8.5 *		1.22	13.36 **
N x FYC	3		2.39	1.48		3.22	5.39 *
H x FYC	2		6.95	1.64		6.47	0.48
N x H x FYC	6		13.42 *	4.72 *		6.68	6.77 **
Error (c)	36		4.55	1.94		3.29	1.74

^z Replicates

^{x, y}: Linear and quadratic effect of N

^{w, v, and u}: Northrup King 0565, Pioneer 3979 and Pioneer 3962

*, **, ***: Significant at the 0.05, 0.01 and 0.001 probability levels respectively.

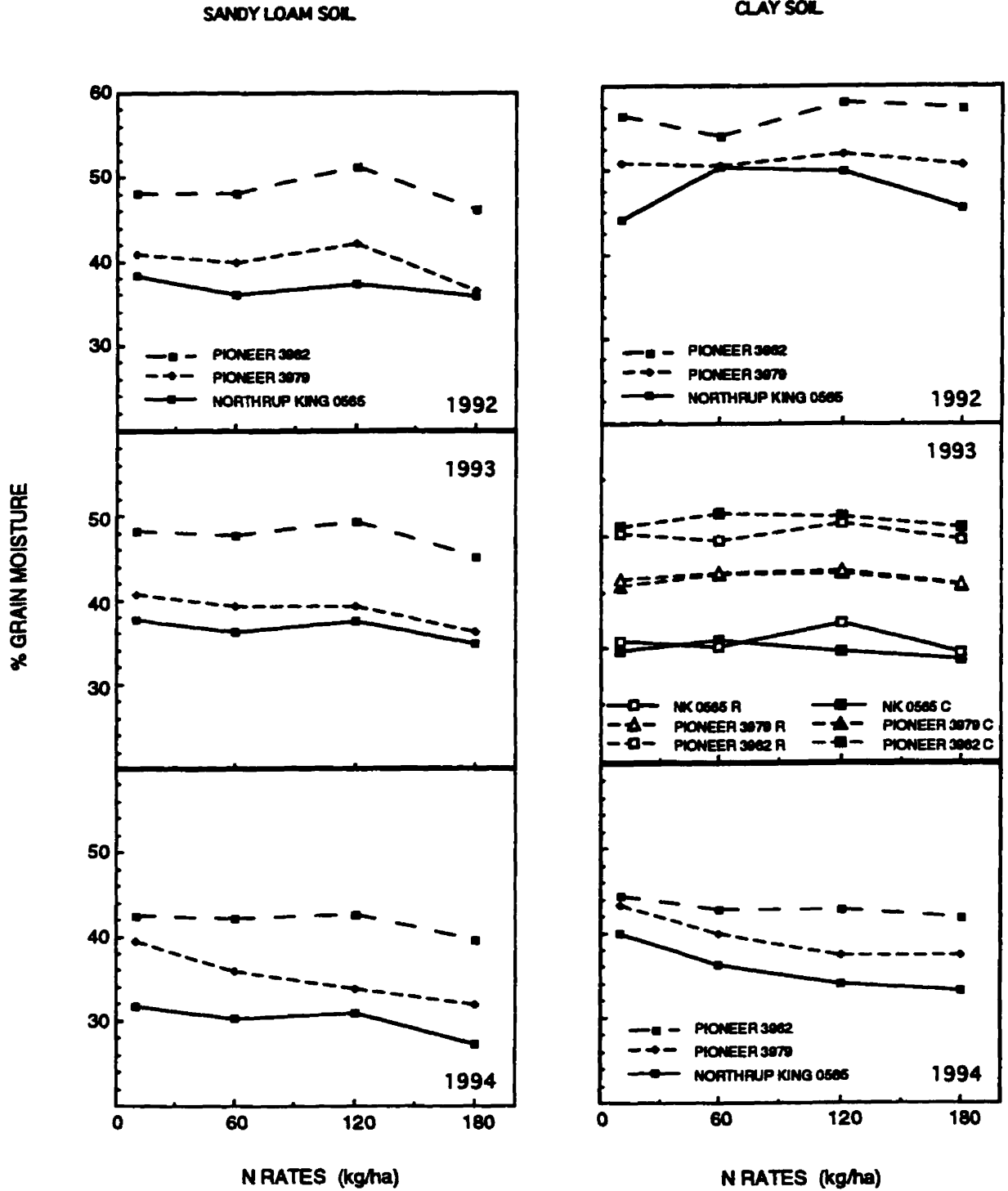


Figure 2.1. Grain % moisture at harvest on the sandy loam soil (at Saint-Anselme) and on the clay soil (at Saint-Nicolas) for three corn hybrids (Northrup King 0565, Pioneer 3979 and Pioneer 3962) in 1992, 1993 and 1994. Due to significant interaction between hybrid and previous crop on the clay soil in 1993, two curves are presented for each corn hybrid, in the monoculture (C) and in the rotation (R).

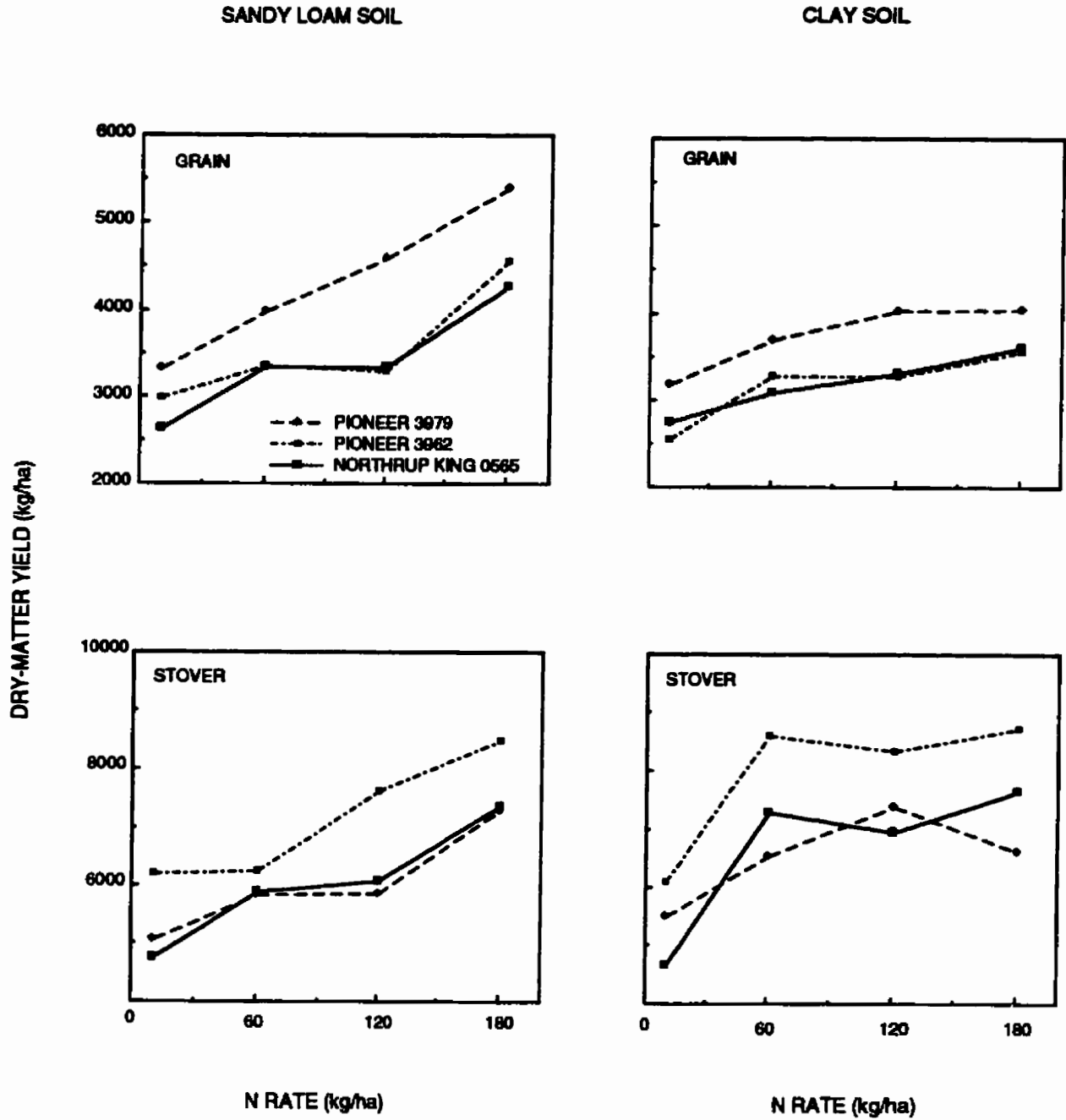


Figure 2.2. First-year (1992) yields (grain and stover) of three corn hybrids (Northrup King 0565, Pioneer 3979 and Pioneer 3962) on the sandy loam soil (at Saint-Anselme) and on the clay soil (at Saint-Nicolas).

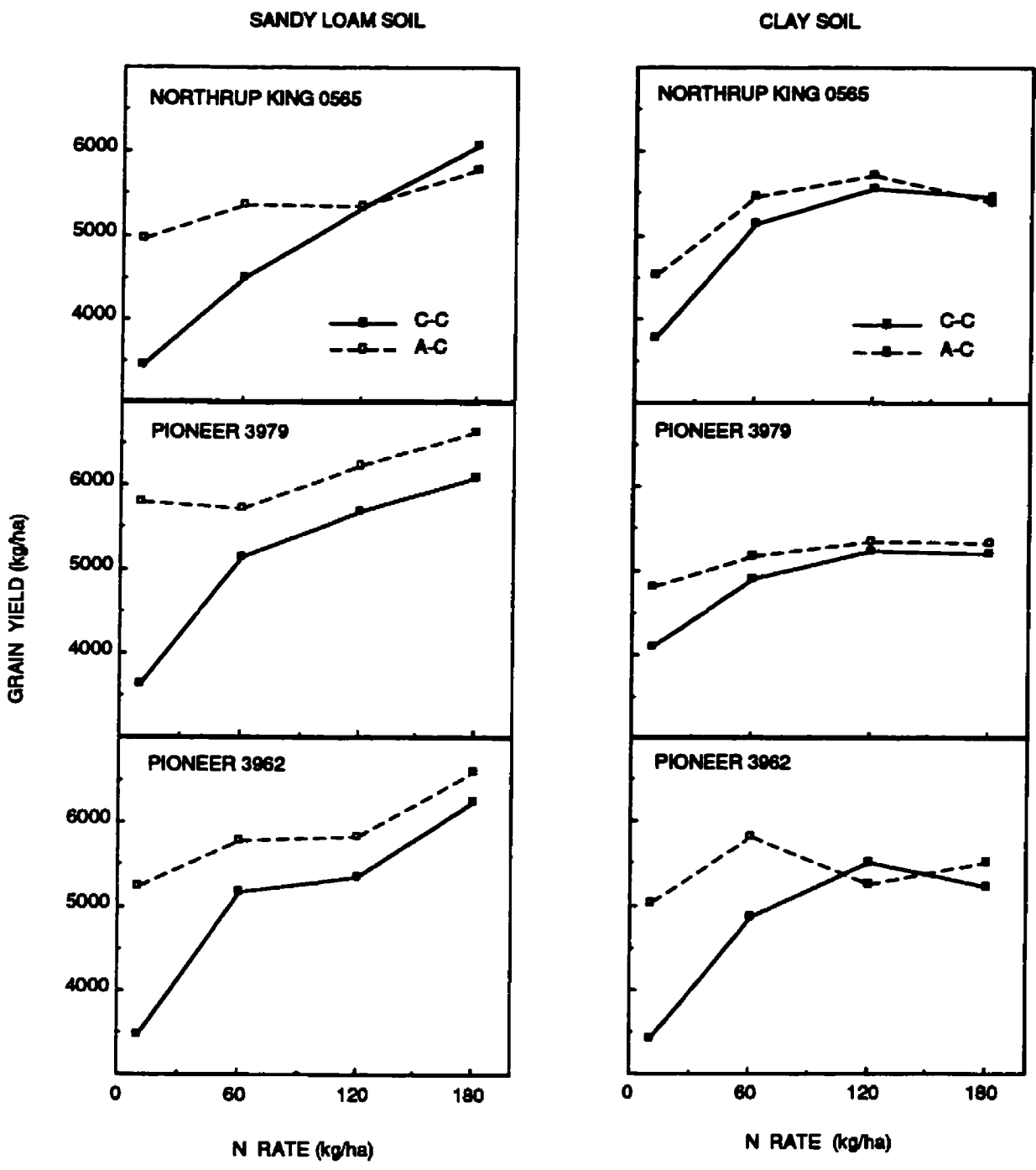


Figure 2.3. Second-year (1993) grain yield of three corn hybrids (Northrup King 0565, Pioneer 3979 and Pioneer 3962) after first-year com (C-C) or first-year nondormant alfalfa (A-C) on the sandy loam soil (at Saint-Anselme) and on the clay soil (at Saint-Nicolas).

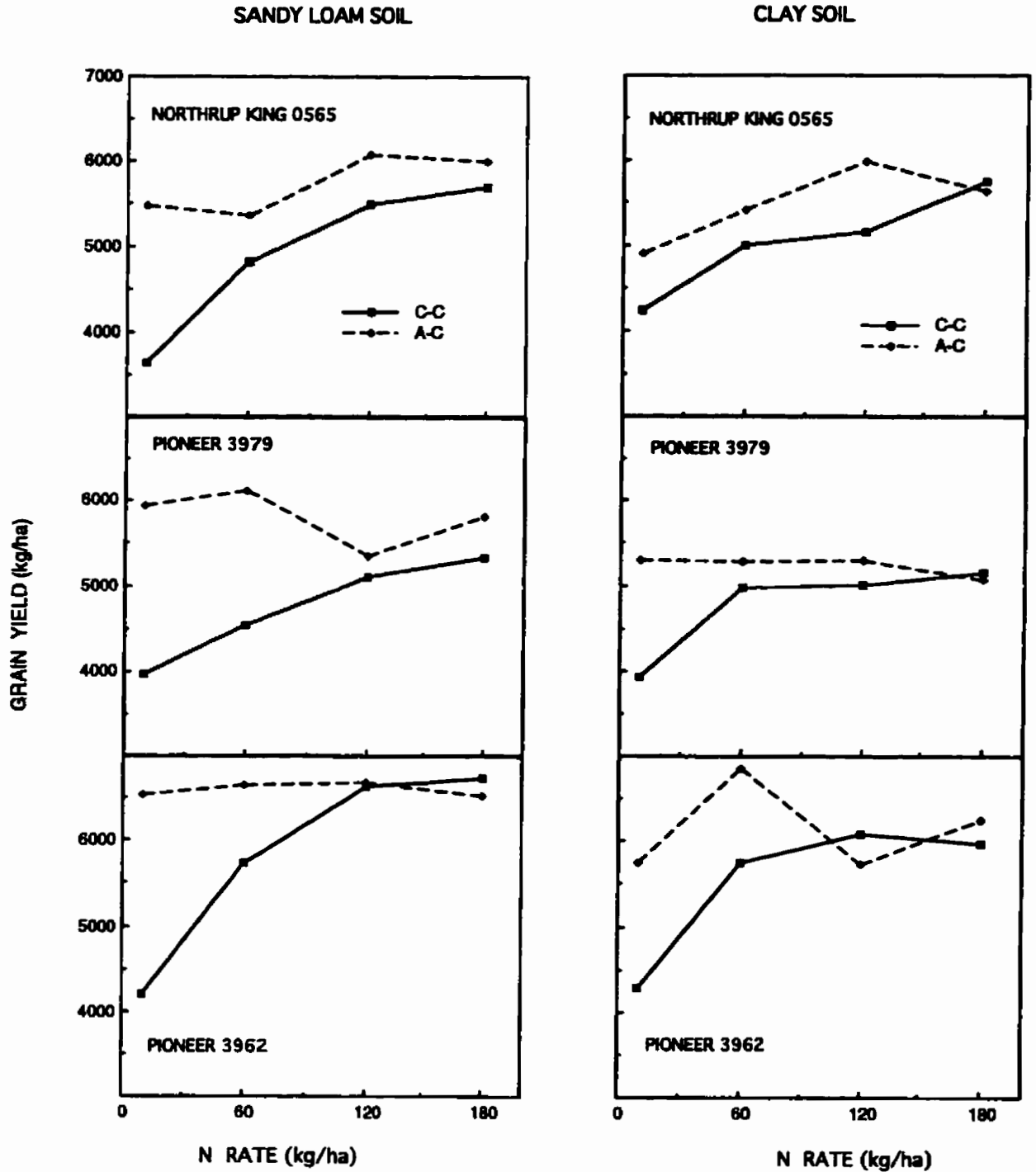


Figure 2.4. Second-year (1993) stover yield of three corn hybrids (Northrup King 0565, Pioneer 3979 and Pioneer 3962) after first-year corn (C-C) or first-year non-dormant alfalfa (A-C) on the sandy loam soil (at Saint-Anselme) and on the clay soil (at Saint-Nicolas).

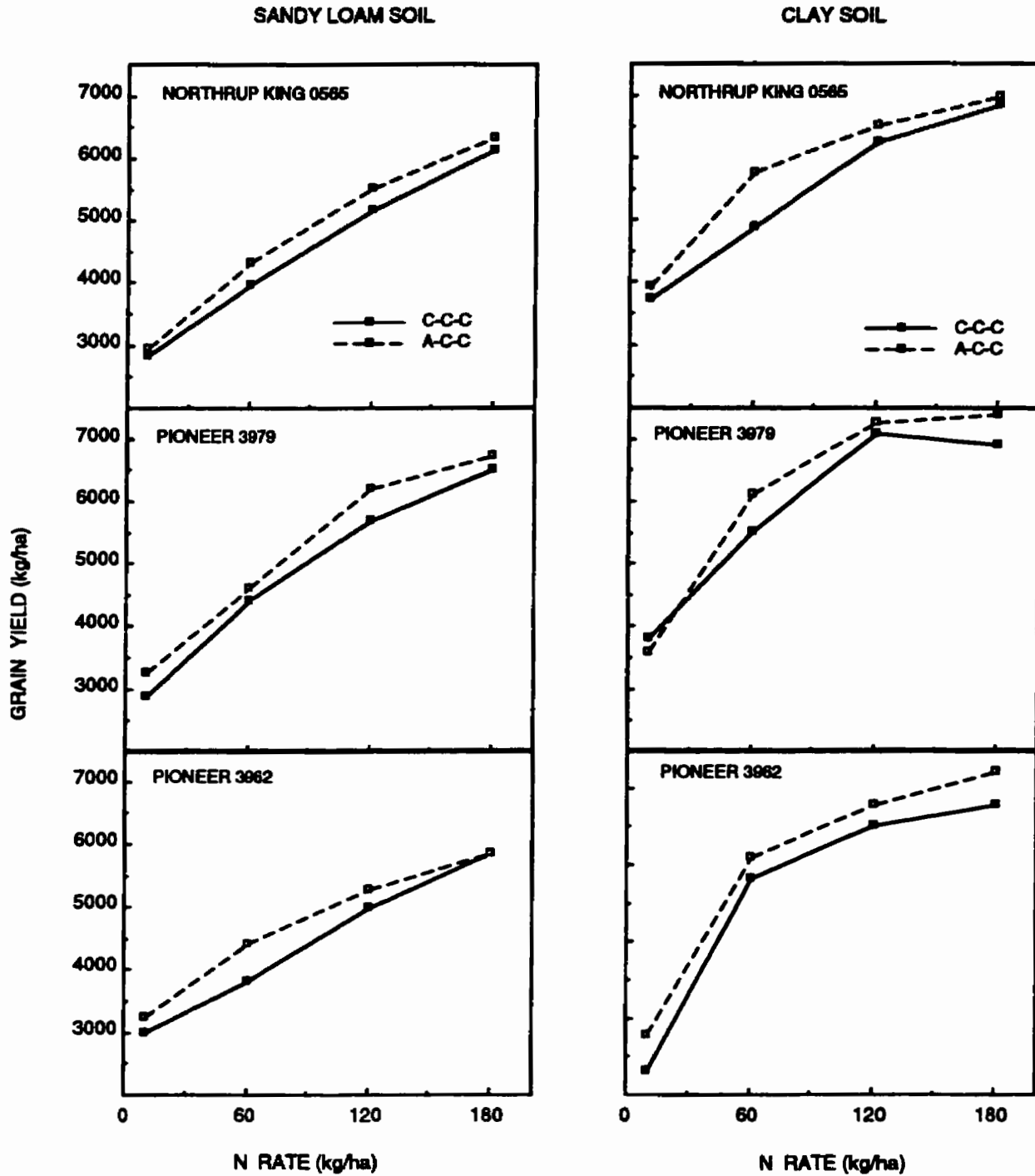


Figure 2.5. Third-year (1994) grain yields of three corn hybrids (Northrup King 0565, Pioneer 3979 and Pioneer 3962) after first-year corn (C-C-C) or first year non dormant alfalfa (A-C-C) on the sandy loam soil (at Saint-Anselme) and on the clay soil (at Saint-Nicolas).

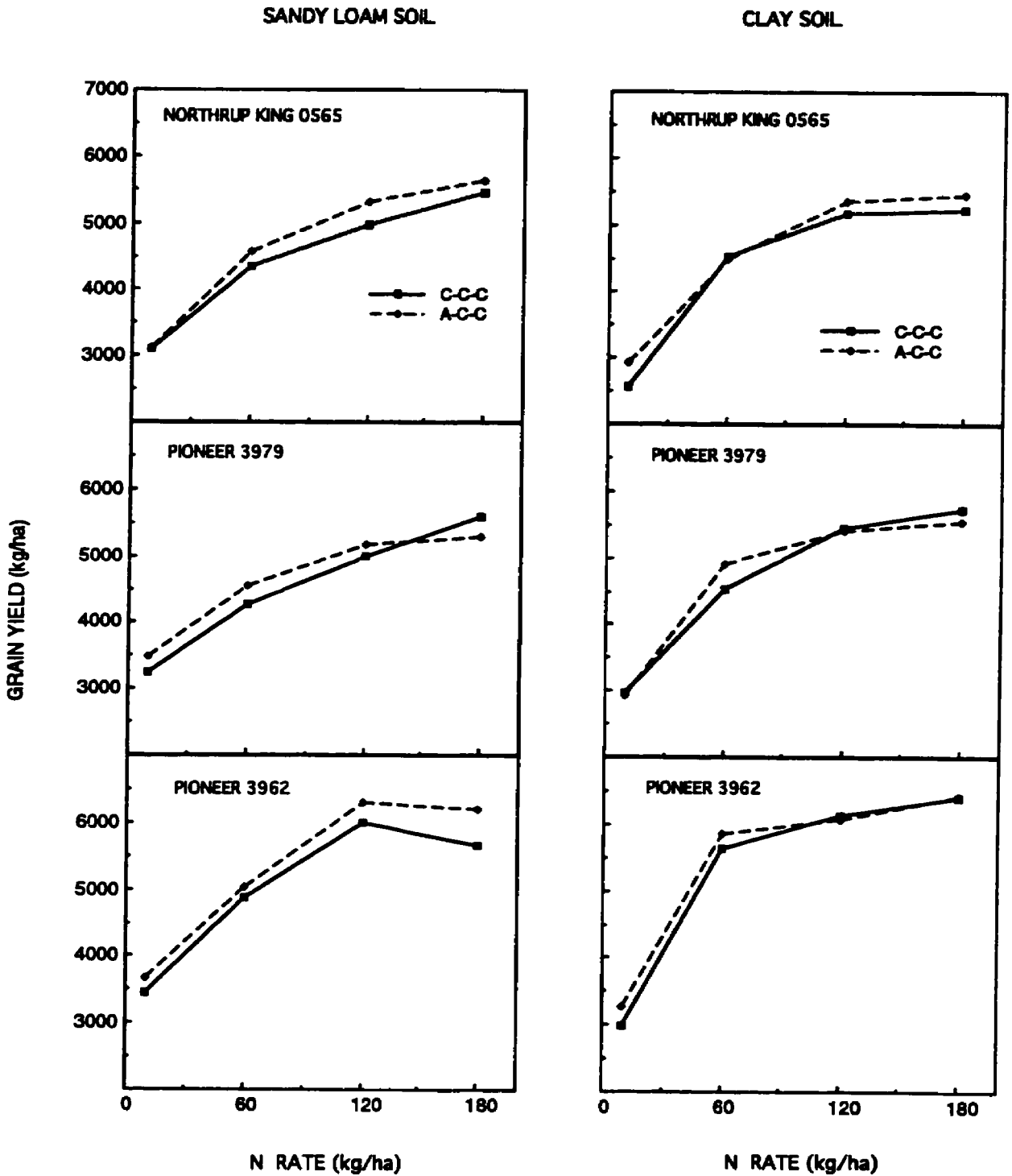


Figure 2.6. Third-year (1994) stover yields of three corn hybrids (Northrup King 0565, Pioneer 3979 and Pioneer 3962) after first-year corn (C-C-C) or first-year non dormant alfalfa (A-C-C) on the sandy loam soil (at Saint-Anselme) and on the clay soil (at Saint-Nicolas).

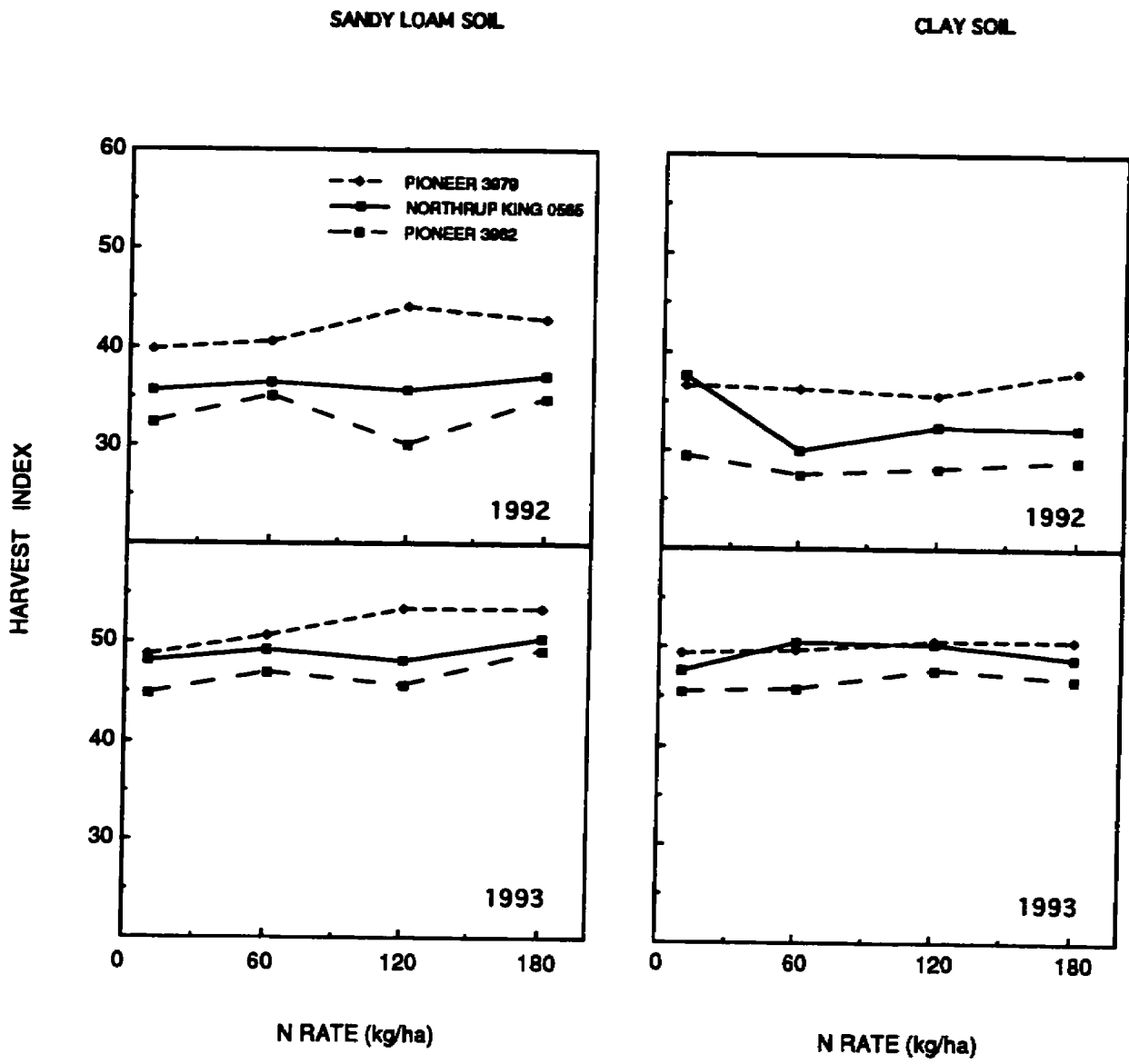


Figure 2.7. Harvest index on the sandy loam soil (at Saint-Anselme) and on the clay soil (at Saint-Nicolas) for three corn hybrids (Northrup King 0565, Pioneer 3979 and Pioneer 3962) in 1992 and 1993.

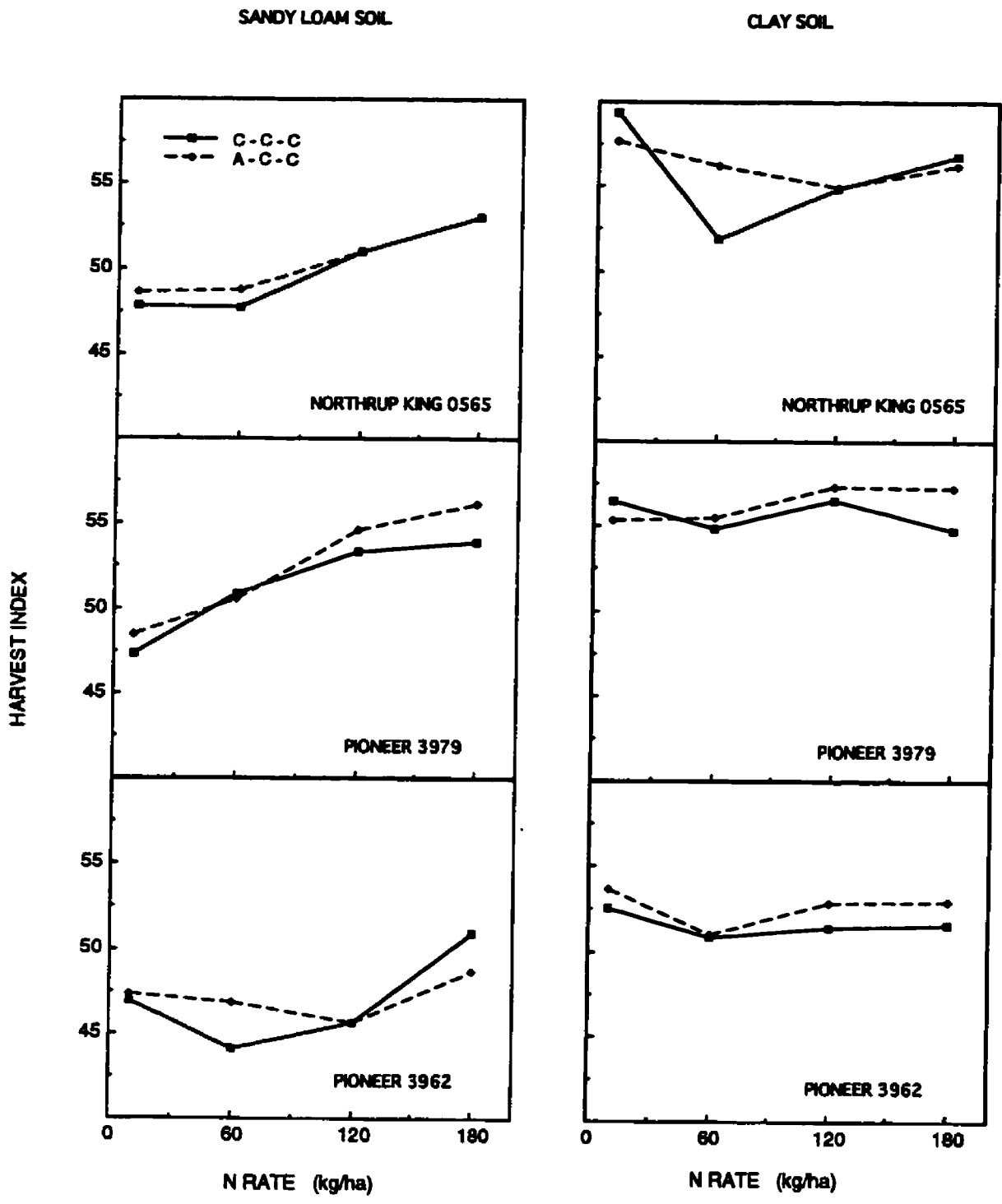


Figure 2.8. Harvest index on the sandy loam soil (at Saint-Anselme) and on the clay soil (at Saint-Nicolas) of three corn hybrids (Northrup King 0565, Pioneer 3979 and Pioneer 3962) grown in monoculture (C-C-C) or in rotation with alfalfa (A-C-C) in 1994.

References

- Albus, W.L. and J.T. Moraghan, 1995. Responses of three early maturing corn hybrids to nitrogen fertilizer. *J. Prod. Agric.* 8:581-584.
- Aldrich, S.R., W.O. Scott and R.G. Hoelt. 1986. Modern corn production. 3rd edition. A & L Publications, Inc. Champaign, IL.
- Baldock, J. O., L.R. Higgs, W.H. Paulson, J.A. Jacobs and W.D. Schrader. 1981. Legume and mineral N effects on crop yields in several crop sequences in the upper Mississippi Valley. *Agron. J.* 73:885-890.
- Brown, D.M. 1986. Corn yield response to irrigation, plant population and nitrogen in a cool humid climate. *Can. J. Plant Sci.* 66:453-464.
- Bundy, L.G., and P.R. Carter. 1988. Corn hybrid response to nitrogen fertilization in the Northern Corn Belt. *J. Prod. Agric.* 1:99-104.
- Bruuslema, T.W. and B.R. Christie. 1987. Nitrogen contribution to succeeding corn from alfalfa and red clover. *Agron. J.* 79:96-100.
- Carlone, M.R and W.A. Russel, 1987. Response to plant densities and nitrogen levels for four maize cultivars from different eras of breeding. *Crop Sci.* 27: 465-470.
- Chakor I.S. and O.P. Awasthi. 1985. Grain moisture content (percentage) a real test for judging right stage of maize (*Zea mays* L.) maturity in hills. *Seeds and Farms.* 11: 27-29.
- Cerrato, M.E. and A.M. Blackmer. 1990. Comparisons of models for describing corn yield response to nitrogen fertilizer. *Agron. J.* 82:138-143.

Conseil des Productions Végétales du Québec. 1989. Grilles de fertilisation, révision 1989. CPVQ, Ministère de l'Agriculture, des pêcheries et de l'alimentation, Québec.

Conseil des Productions Végétales du Québec (CPVQ). 1994. Grilles de référence en fertilisation. AGDEX 540. Ministère de l'Agriculture, des pêcheries et de l'alimentation, Québec. 91 pp.

Cross, H.Z. and K.M. Kabir. 1989. Evaluation of field dry-down rates in early maize. Crop Sci. 29: 54-58.

Danso, S.K.A. and I. Papastylianou. 1992. Evaluation of the nitrogen contribution of legumes to subsequent cereals. J. Agric. Sci. 119:13-18.

Donald, C.M. 1962. In search of yield. J. Aust. Inst. Agric. Sci. 28:171 - 178.

Donald, C.M. and J. Hamblin. 1976. The biological yield and harvest index of cereals as agronomic and plant breeding criteria. Adv. Agron. 28:361-405.

Filion, P. 1996. Portrait de la production québécoise de maïs. Pages 9-15 Dans, Compte rendu de conférences, Colloque sur le maïs-grain. Conseil des Productions Végétales du Québec. Québec, QC.

Fox, R.H. and W.P. Piekielek. 1988. Fertilizer N equivalence of alfalfa, birdsfoot trefoil and red clover for succeeding corn crops. J. Prod. Agric. 1:313-317.

Gardner, C.A.C., P.L. Bax, D.J. Bailey, A. J. Cavalieri, C.R. Clausen, G.A. Luce, J.M. Meece, P. A. Murphy, T.E. Piper, R.L. Segebart, O.S. Smith, C.W. Tiffany, M.W. Trimble and B.N. Wilson. 1990. Response of corn hybrids to N fertilizer. J. Prod. Agric. 3:39-43.

Grimard, Y. 1990. Qualité générale de l'eau au Québec. Pages 23-38 dans : Colloque sur la conservation de l'eau en milieu agricole. CPVQ, Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation, Gouvernement du Québec.

Harris, G.H. and O.B. Hesterman. 1990. Quantifying the nitrogen contribution from alfalfa to soil and two succeeding crops using nitrogen-15. *Agron. J.* 82: 129-134.

Heichel, G.H. 1987. Legumes as a source of nitrogen in conservation tillage systems. pp. 29-35. *In*, J.F. Power (ed.) The role of legumes in conservation tillage systems. Soil Conservation Society of America, Ankeny, Iowa.

Hesterman, O.B., C.C. Sheaffer, D.K. Barnes, W.E. Lueschen and J.H. Ford. 1986. Alfalfa dry-matter and nitrogen response in legume corn rotations. *Agron. J.* 78:19-23.

Isfan, D., J. Zizka, A. D'Avignon and M. Deschênes. 1995. Relationships between nitrogen rate, plant nitrogen concentration, yield and residual soil nitrate-nitrogen in silage corn. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 26:2531-2557.

Kelner, D.J. and J.K. Vessey. 1995. Nitrogen fixation and growth of one-year stands of non-dormant alfalfa in Manitoba. *Can. J. Plant Sci.* 75: 655-665.

Kurtz, L.T., L.V. Boone, T.R. Peck and R.G. Hoefl. 1984. Crop rotations for efficient nitrogen production. p. 295-305. *In*, R.D. Hauck (ed) Nitrogen in crop production ASA, CSSA and SSSA, Madison, WI.

Liang, B.C. and A.F. Mackenzie. 1994. Corn yield, nitrogen uptake and nitrogen use efficiency as influenced by nitrogen fertilization. *Can. J. Soil Sci.* 74:235-240.

Major, D.C. and R.I. Hamilton, 1978. Adaptation of corn for whole plant silage in Canada. *Can. J. Plant Sci.* 63:121-130.

Major, D.J., R.J. Morrison, R.E. Blackshaw and B.T. Roth, 1991. Agronomy of dryland corn production at the northern fringe of the great plains. *J. Prod. Agric.* 4:606-613.

McKeague, J.A. (éd.) 1978. Manual of soil sampling and methods of analysis. Prepared by Can. Soil Survey Committee. Canadian Society of Soil Science, Ottawa, ON. 250 pp.

Paquin, R., M. Bernier-Cardou and Y. Castonguay. 1987. Influence de l'humidité du sol, de la température et de la durée du gel sur la survie de la luzerne. *Can. J. Plant Sci.* 67: 765-775.

Paré, T., Chalifour, F.-P., Bourassa, J. and Antoun, H. 1992. Forage-corn dry matter yields and N uptake as affected by previous legumes and nitrogen fertilizer. *Can. J. Plant Sci.* 72 699-712.

Paré, T., Chalifour, F.-P., Bourassa, J. and Antoun, H. 1993. Residual effects of faba bean and soybean for a second or third succeeding forage-corn production. *Can. J. Plant Sci.* 73:495-507.

Peterson, T.A. and M.P. Russelle. 1991. Alfalfa and the nitrogen cycle in the Corn Belt. *J. Soil and Water Cons.* 46:229-235.

Peterson, T.A. and G.E. Varvel. 1989. Crop yield as affected by rotation and nitrogen rate. III. Corn. *Agron. J.* 81:735-738.

Senaratne, R. and G. Hardarson. 1988. Estimation of residual N effect of faba bean and pea on two succeeding cereals using ¹⁵N methodology. *Plant and Soil* 100:81-89.

Sheaffer, C.C., M.P. Russelle, G.H. Heichel, M.H. Hall and F.E. Thicke. 1991. Nonharvested forage legumes : Nitrogen and dry matter yields and effects on subsequent corn crop. *J. Prod. Agric.* 4:520-525.

Statistical Analysis System Institute, Inc. 1990. SAS user's guide : Statistics. 6 th ed., SAS Institute Inc., Cary, NC.

Steel, R.G.D. and J.H. Torrie. 1980. Principles and procedures of statistics : A biometrical approach. McGraw-Hill Publishing Co. NY.

Tabi, M., L. Tardif, D. Carrier, G. Laflamme and M. Rompré. 1990. Rapport de synthèse. Entente auxiliaire Canada-Québec sur le développement agro-alimentaire. Publ. no. 90-130156, Gouvernement du Québec, Québec, PQ. 71 pp.

Tran, T., Sen. 1994. Efficacité et devenir de l'engrais azoté marqué (^{15}N) appliqué à la culture de maïs (*Zea mays* L.). Thèse de Doctorat. Université Laval, Saint-Foy. 157 pp.

Tran, T., Sen et Simard, R.R. 1993. Mehlich III-extractable elements. Pages 43-49, In, M.R. Carter (ed). Soil sampling and methods of analysis. Canadian Society of Soil Science. Lewis Publishers, Boca Raton.

Troyer, A.F. and W.B. Ambrose. 1971. Plant characteristics affecting drying rate of ear com. Crop Sci. 11: 529-531.

White, R.P. 1978. Cultural practices affecting maturity and yield of corn (*Zea mays* L.) for whole-plant silage in short-season areas. Can. J. Plant Sci. 58:629-642.

Le Chapitre II rapportait l'impact de l'inclusion d'une luzerne non dormante en tête de rotation avec le maïs et de la fertilisation azotée sur la teneur en eau du grain à la récolte, le rendement en grain et en cannes et l'indice de récolte de trois hybrides de maïs hâtifs. La luzerne a favorisé le rendement du maïs subséquent. La réponse à l'N a été affectée par la rotation et l'hybride cultivé.

En effet, la culture d'une année de luzerne a contribué à l'augmentation du rendement des trois hybrides de maïs étudiés. Toutefois, la réponse à l'azote (N) a varié en fonction de l'hybride et du précédent cultural. En particulier, la réponse à l'engrais azoté était plus faible suite à la culture de luzerne, ce qui suggère une contribution de la légumineuse à la nutrition azotée du maïs subséquent. Il est alors important de déterminer les quantités d'N à créditer pour un précédent de luzerne.

L'effet d'un apport d'N dans un système de culture par la rotation avec des légumineuses ou par la fertilisation azotée n'atteint réellement son but que si la culture visée utilise efficacement l'N à sa disposition. La connaissance de l'efficacité d'utilisation de l'N disponible est donc essentielle. De plus, l'hybride le plus satisfaisant serait celui qui absorbe le plus d'N, produit le plus de grain par unité d'N et accumule le plus d'N dans le grain.

Le Chapitre III vise l'évaluation du crédit d'N pour une année de luzerne non dormante. Il cherche également à déterminer à quelle dose d'N l'engrais minéral appliqué est utilisé le plus efficacement par le maïs en rotation ou en monoculture. Enfin, il compare trois hybrides hâtifs quant à leur efficacité d'utilisation de l'N d'un engrais dans les successions culturales étudiées.

CHAPITRE III

NUTRITION AZOTÉE DU MAÏS HÂTIF EN MONOCULTURE ET EN ROTATION AVEC UNE LUZERNE NON DORMANTE

NUTRITION AZOTÉE DU MAÏS HÂTIF EN MONOCULTURE ET EN ROTATION AVEC UNE LUZERNE NON DORMANTE

Résumé

Dans les régions à courte saison de croissance, très peu d'informations sont disponibles sur les quantités d'azote (N) à créditer pour des précédents de luzernes non dormantes. Les objectifs de cette étude étaient (i) d'évaluer l'impact de la rotation et de la fertilisation azotée sur le prélèvement et la concentration d'N de deux cultures subséquentes de maïs-grain (*Zea mays* L.), (ii) de déterminer les valeurs de remplacement en fertilisant azoté d'une année de luzerne (*Medicago sativa* L. var. Nitro) et (iii) de comparer les hybrides et les successions culturales quant à l'efficacité d'utilisation de l'N et aux indices de récolte de l'N. Les travaux ont été effectués de 1992 à 1994 sur un loam sableux Rivière-du-loup (Podzol Humo-ferrique) et sur argile Kamouraska (Gleysol humique). La luzerne a reçu 10 kg N ha⁻¹ et les hybrides de maïs 10, 60, 120 ou 180 kg N ha⁻¹ sous forme de NH₄NO₃. Sur la base des rendements en grain, les valeurs de remplacement en fertilisant azoté (VRFA) de la luzerne Nitro ont été de 78 à 106 kg N ha⁻¹ sur le loam sableux et de 28 à 59 kg N ha⁻¹ sur argile. Sur la base du prélèvement d'N du grain, les VRFA ont varié de 65 à 84 kg N ha⁻¹ sur le loam sableux et de 27 à 45 kg N ha⁻¹ sur argile. Les VRFA étaient plus élevées pour les hybrides Pioneer 3979 et Northrup King 0565. En 1994, les VRFA ont été moins importantes. Les teneurs en N des tissus et les prélèvements d'N étaient plus élevés dans la rotation et aux faibles doses d'N. Les efficacités physiologique, de rendement et de récupération de l'N sur les bases incrémentales et cumulatives ont été plus faibles dans les rotations. Elles ont varié selon la dose d'N et l'hybride. L'indice de récolte d'N a été plus important pour les hybrides adaptés. Ainsi, un précédent d'une année de luzerne Nitro contribue à la nutrition azotée du maïs-grain subséquent. Toutefois, l'importance de cette contribution dépend de la région, des hybrides et du type de sol.

NITROGEN NUTRITION OF EARLY MATURING CORN HYBRIDS IN MONOCULTURE OR FOLLOWING ALFALFA

Abstract

In northern regions with short growing seasons, little information is available on amounts of N to credit from nondormant alfalfa to corn. The objectives of this study were (i) to determine the impact of N fertilizer on N concentration and uptake of three early corn hybrids grown in monoculture or preceded by one-year alfalfa, (ii) to evaluate the N fertilizer replacement values (NFRV) of one-year of nondormant alfalfa (*Medicago sativa* L. var. Nitro) for two consecutive years of corn (*Zea mays* L.) production and (iii) to compare hybrids and crop successions relative to N use efficiency and N harvest index. Field studies were conducted in the Province of Quebec (Canada) from 1992 through 1994 on a Rivière-du-Loup sandy loam (Humo-Ferric Podzol) and on a Kamouraska clay (Humic Gleysol). Alfalfa received 10 kg N ha⁻¹ and corn hybrids in monoculture or following alfalfa 10, 60, 120 or 180 kg N ha⁻¹ as NH₄NO₃. In 1993, based on grain dry-matter yields, NFRV of alfalfa Nitro ranged between 78 and 106 kg N ha⁻¹ on the sandy loam and between 28 and 59 kg N ha⁻¹ on the clay. On grain N uptake basis, NFRV varied between 65 and 84 kg N ha⁻¹ on the sandy loam soil and between 27 to 45 kg N ha⁻¹ on clay. The alfalfa NFRV was larger with Pioneer 3979 and Northrup King 0565 than with Pioneer 3962. In 1994, NFRV values decreased. Corn N concentrations and uptake were larger in rotation than in monocultures and particularly at low N rates. Yield, N recovery and physiological efficiencies on both incremental and cumulative bases were lower in the rotation than in monoculture. These efficiency estimates were also affected by N rate and hybrid. Nitrogen harvest index was larger for adapted hybrids. A single year of alfalfa var. Nitro contribute large amounts of N to the following corn crops but this contribution will depend on crop succession, hybrid and soil type.

Introduction

Legumes provide an alternate and inexpensive N source for themselves and to other crops when used as first crops in rotations (Danso and Papastylianou, 1992; Paré et al., 1992), as green manures (Heichel, 1987; Harris and Hesterman, 1990) or companion crops in intercroppings (Eaglesham et al., 1986; Patra et al., 1986). The beneficial effects of legumes are mainly attributed to soil N conservation and to increased soil N resulting from the mineralization of fixed N_2 by the legume crops (Paré et al., 1992).

Legumes in rotations provide may be more than their N contribution to subsequent crops. Corn (*Zea mays* L.) after alfalfa (*Medicago sativa* L.) with or without added N, often reach higher yields than by adding fertilizer to continuous corn (Morris et al., 1993). Thus, N fertilizer can compensate for much, but not all the rotational benefits of alfalfa (Lory et al. 1995a).

The contribution of legumes to the N nutrition of succeeding non-legumes depend on legume species, management practices and soil and climatic conditions. Fox and Piekielek (1988) reported that alfalfa incorporation before corn planting resulted in available N equal to or greater than that provided by 187 kg fertilizer N ha⁻¹. In the province of Ontario (Canada), legume plowdown supported corn yields equivalent to those achieved with 90 to 125 kg N ha⁻¹ of N fertilizer (Bruuslema and Christie, 1987). The N fertilizer replacement values (NFRV) for two years of faba bean (*Vicia faba* L.) and soybean (*Glycine max* [L] Merr.) for forage-corn varied from 60 to 125 kg N ha⁻¹ and from 14 to 33 kg N ha⁻¹, respectively (Paré et al., 1993).

In the US Corn Belt, N fertilizer recommendations for first-year corn after alfalfa are derived by estimating the amounts of N needed by corn and then subtracting an estimate of the amounts of N supplied by alfalfa (Morris et al., 1993). An adjustment of 45 to 180 kg N ha⁻¹ is recommended for average to good alfalfa stands; several states

also recommend a reduction of N rates by 22 to 56 kg ha⁻¹ for the second year following alfalfa (Kurtz et al., 1984). The Conseil des Productions Végétales du Québec (CPVQ Inc., 1994) recommends N credits of 40 to 70 kg N ha⁻¹ to account for previous alfalfa roots and crown plowdown. Barnett (1996) however indicated that this recommendation was not obtained from local experimentation. Estimates of previous alfalfa N contribution to corn are needed in the cool and humid Quebec.

Under Quebec climate, winter survival of dormant alfalfa stands is not warranted and non dormant cultivars managed as annuals may yield more herbage and provide more N to subsequent corn compared to dormant cultivars. In Minnesota, non dormant alfalfa var. Nitro was found superior to dormant cultivar var. Saranac AR for herbage production, N concentration in roots and amounts of symbiotically fixed N₂ provided for plowdown (Pfarr, 1988).

Inputs of N by legumes in rotations affect the subsequent crops fertilizer N use efficiency (NUE) (Kurtz et al., 1984). For the producer, there is the potential for increasing the net return on a crop by reducing the quantity of N fertilizer required to obtain the optimum economic yield. This may reduce runoff and leaching of excess N. A corn hybrid which absorbs more N, produces more grain per unit of absorbed N and stores more N in the grain would be preferred. The nitrogen harvest index (NHI) (grain N uptake/total shoot N) describes the partitioning of available N between grain and stover at maturity (Dhugga and Waines, 1989). It can be used to explain corn hybrid NUE differences in a given environment (Moll et al., 1982).

The relationships between yield and N rates (yield efficiency), N recovered and N rates (N recovery efficiency) or yield and N recovered (physiological efficiency) on both incremental and cumulative basis provide a mean to evaluate hybrids, N management and cropping systems (Bock, 1984). Such information is particularly important where unfavorable weather conditions are limiting.

It is recognized that in the northward adaptation of corn, the crop is first grown primarily for whole-plant silage and, as new hybrids are developed, corn is grown for grain (Major and Hamilton, 1978). Thus, it is important to study N in both grain and stover since corn may be harvested for grain or silage. The objectives of this study were : (i) to determine the impact of N fertilizer on N composition and uptake of three corn hybrids in monoculture or when preceded by one-year alfalfa, (ii) to evaluate NFRV of one-year non dormant alfalfa on two consecutive years of corn production and (iii) to compare hybrids and crop successions relative to NUE.

MATERIALS AND METHODS

Trials were conducted from 1992 through 1994 in Quebec (Canada) on a Rivière-du-Loup sandy loam (Humo-ferric Podzol) at Saint-Anselme and on a Kamouraska clay (Humic Gleysol) at Saint-Nicolas. Soil properties, plot size, plant densities, herbicides and other cultural practices involved were described in detail in Chapter II.

In 1992, half of the experimental plots were seeded with alfalfa and the other half was seeded with corn which received different N rates (i.e. 10, 60, 120 or 180 kg N ha⁻¹). Corn hybrids were Northrup King 0565, Pioneer 3979 and Pioneer 3962. Their respective corn heat unit (CHU) requirements are 2300, 2325 and 2500. In 1993 and 1994, all plots were planted with corn and effect of alfalfa as first crop in the rotation vs corn monoculture could be examined.

In 1993 and 1994, corn plots in monoculture or preceded by one-year alfalfa received 10, 60, 120 or 180 kg N ha⁻¹ as NH₄NO₃. Nitrogen fertilizer was banded twice. One fraction (10 or 25 kg N ha⁻¹) was applied at planting and the other fraction (0, 35, 95 or 155 kg N ha⁻¹) at the six- to eight-leaf stage (tassel initiation). The N rates were the main plot factor, the corn hybrids the sub-plot factor and the first-year crop in the rotation (corn or alfalfa) the sub-sub-plot factor.

Plant fractions (grain and stover) were obtained from three inner rows in each eight-row corn plot. Dry matter yields (DMY) are reported in Chapter II. Sub-samples of grain and stover were first ground with a Wiley Mill to pass through a 2 mm screen and then through a 0.08 mm screen using a Retsch ultracentrifugal mill Model ZM-1 (Brinkmann Instruments Ltd., Mississauga, Ontario, Canada). Total N concentrations were determined on the ground samples by colorimetry. A pre-digestion with salicylic acid was effected to include nitrates (McKeague, 1978).

Nitrogen uptake was determined by the product of DMY and N concentrations of all harvested components. The NFRV were quantified by both the traditional and the difference methods (Lory et al., 1995a). The traditional method is based on fertilizer-N equivalence, which refers to the amount of fertilizer N required to attain yields of continuous corn equal to those attained after alfalfa without fertilization (Hesterman, 1988). A fertilizer response curve is developed for the continuously cropped non-legume. The N credit on DMY basis is obtained by solving the equation or graphically, when the yield of fertilized nonlegume is equal to the yield of the nonfertilized crop grown in rotation. The NFRV on the N uptake basis is obtained similarly. Instead of yield curves, N uptake curves are considered (Paré et al., 1993). The N credit was reduced by 10 kg N ha⁻¹ because an equivalent amount of fertilizer N was applied in all corn plots (¹⁵N was needed as tracer in a concurrent study).

The N credit estimated by the difference method is the subtraction between the economic N rate of the conventionally fertilized non legume and the economic N rate of the non legume grown in rotation (Lory et al., 1995a). Economic N rates are derived directly from fertilizer response curves. N credit may thus change with prices of fertilizer and the harvested product. We replaced economic N rates with the optimum N rates as estimated by the quadratic plateau model to remove the dependence on economic criteria contained in the definition. In our experiment, the difference method failed to express N credits for previous alfalfa and therefore was not retained.

Yield efficiency, N recovery efficiency and physiological efficiency were computed as described by Bock (1984) on both incremental and cumulative basis. When N_i , NR_i and Y_i were respectively the N rates, the amount of N recovered and the yield obtained at the i-th N level, the following relationships were used to compute efficiency values on an incremental basis :

$$\text{Recovery efficiency} = [(NR_i - NR_{i-1}) / (N_i - N_{i-1})] \times 100$$

$$\text{Physiological efficiency} = (Y_i - Y_{i-1}) / (NR_i - NR_{i-1})$$

$$\text{Yield efficiency} = (Y_i - Y_{i-1}) / (N_i - N_{i-1}).$$

On the cumulative basis, these expressions were computed as follows :

$$\text{Recovery efficiency} = [(NR_i - NR_{10}) / N_i] \times 100$$

$$\text{Physiological efficiency} = (Y_i - Y_{10}) / (NR_i - NR_{10})$$

$$\text{Yield efficiency} = (Y_i - Y_{10}) / N_i.$$

Where NR_{10} and Y_{10} are the amounts of N recovered and the yield obtained with 10 kg N ha⁻¹.

The nitrogen harvest index (NHI) was calculated as follows :

$$NHI = (N_{\text{grain}} \times 100) / (N_{\text{grain}} + N_{\text{stover}})$$

where : N_{grain} is the grain N uptake

N_{stover} is the stover N uptake.

Statistical analyses were carried out using SAS (Statistical Analysis System Institute, Inc. 1989). For each variable, experimental error variances were tested for homogeneity using Bartlett's test on site x N levels x hybrids x first-year crop combinations (Steel and Torrie, 1980). Orthogonal contrasts were calculated to determine linear or quadratic trends in corn N concentration and uptake. Hybrid comparisons were NK0565 vs P3979 and P3979 vs P3962. Corn hybrid N concentration and uptake in monoculture or following alfalfa were compared using contrasts. Regression equations determining the N response of corn were calculated on the basis of orthogonal trend comparisons. For

each N rate (incremental or cumulative), analyses of variance were made using hybrids and first-year crops as sources of variation. Combined analyses of variance across sites were performed but due to non homogeneous error variances, results are presented and discussed by site.

RESULTS

Nitrogen concentrations

Year 1993

The grain and stover N concentrations increased with fertilizer N application (Tables 3.1 and 3.2). Hybrid differences were observed for N concentrations in both plant fractions. The rotation with alfalfa increased N concentrations in grain and stover. Differential stover N concentration responses to fertilizer N were observed between continuous corn and corn in the rotation.

On the sandy loam soil, the effect of fertilizer N on grain and stover N concentration was affected by the rotation (N x FYC, Tables 3.1 and 3.2). The grain N concentration of all hybrids was higher in the rotation than in monoculture. The magnitude of the differences was more important at the lower N rates (Tables 3.1 and 3.2). Hybrids NK0565 and P3979 had similar grain N concentrations. The grain N concentration of hybrid P3979 was larger compared to that of hybrid P3962 (P3979 vs P3962, Table 3.1 and 3.2). In the stover, the N concentration of hybrid NK0565 was higher compared to that of hybrid P3979 (NK0565 vs P3979, Tables 3.1 and 3.2).

On the clay soil, fertilizer N increased grain N concentration (N_L , Tables 3.1 and 3.2). All corn hybrids had similar grain N concentrations. In the stover, N concentration was larger in the rotation compared to corn monoculture and the magnitude of the difference was more important at the lower N rates (N x FYC, Tables 3.1 and 3.2). Hybrids NK0565

and P3979 had similar stover N concentrations. The stover N concentration of hybrid P3979 was higher than that of hybrid P3962 (P3979 vs P3962, Tables 3.1 and 3.2).

Year 1994

At both sites, no rotation effects were observed for both grain and stover N concentration (Tables 3.1 and 3.2). Fertilizer N had significant impacts on both grain and stover N concentrations.

On the sandy loam soil, there was a differential effect of N fertilizer among corn hybrids for grain N concentration. Grain N concentrations increased with N rates but the increase was larger for hybrids NK0565 and P3962 compared to hybrid P3979. (N x H, Tables 3.1 and 3.2).

On the clay soil, grain and stover N concentrations increased with N rate (N_L , Tables 3.1 and 3.2). Hybrids NK0565 and P3979 had similar N concentrations. Hybrid P3962 had higher N concentration in the stover compared to P3979 (P3979 vs P3962, Tables 3.1 and 3.2).

Nitrogen uptake

Year 1993

Differential N effects on hybrids grain and stover N uptake were observed (N x H, Tables 3.1 and 3.3). The N uptake was larger for hybrid P3979 at lower N rates compared to hybrids NK0565. Differential rotation effects on N rates were observed for grain and stover N uptake (N x FYC, Table 3.3; Figs. 3.1 and 3.2). At both sites, uptake of N by grain and stover was larger in the rotation. The observed differences were greater at low N rates (N_L x FYC, Table 3.3; Figs 3.1 and 3.2).

Year 1994

At both sites, grain and stover N uptake of all hybrids increased with fertilizer N rate (Table 3.3; Figs. 3.3 and 3.4). Differential N uptake responses to N fertilizer were observed among hybrids and between plant tissues (N x H, Table 3.3; Figs 3.1 to 3.3)

On the sandy loam soil, hybrids NK0565 and P3979 had similar grain N uptake, and higher than that of hybrid P3962 (H, Table 3.3; Fig. 3.3). Grain N uptake of NK0565 increased more between 120 and 180 kg N ha⁻¹ than that of P3979, which tended to level off at 120 kg N ha⁻¹ (Table 3.3; Fig. 3.3). Grain N uptake of hybrids P3979 and P3962 increased in the rotation compared to the monoculture, but N uptake of hybrid NK0565 did not (N x H and H x FYC, Table 3.3; Fig 3.3).

On the sandy loam soil, hybrids NK0565 and P3979 also had similar stover N uptake (NK0565 vs P3979), lower than that of hybrid P3962 (P3979 vs P3962) (Table 3.3; Fig. 3.4). Stover N uptake was generally larger in the rotation compared to the monoculture (FYC, Table 3.3; Fig. 3.4), although differences were smaller than for grain N uptake. Also, all hybrids responded similarly in the rotation and in the monoculture (H x FYC not significant, Table 3.3; Fig. 3.4).

On the clay soil, corn grain N uptake increased linearly with N rates (N_L, Table 3.3, Fig. 3.3). Grain N uptake tended to level off at 120 kg N ha⁻¹ (N₀, Table 3.3; Fig. 3.3). Grain N uptake was similar for all hybrids (H not significant, Table 3.3; Fig. 3.3). There was also greater corn grain N uptake in the rotation than in monoculture (FYC, Table 3.3, Fig. 3.3).

On the clay soil also, hybrids differed for stover N uptake (H, Table 3.3; Fig. 3.4). Stover N uptake by hybrids NK0565 and P3979 was similar (NK0565 vs P3979, Table 3.3) and lower than that by hybrid P3962 (P3979 vs P3962, Table 3.3; Fig. 3.4).

Nitrogen fertilizer replacement values (NFRV)

Data reported were obtained by the traditional method based on fertilizer-N equivalence. In 1993, using grain dry-matter yields, NFRV of nondormant alfalfa 'Nitro' ranged between 78 and 106 kg N ha⁻¹ on the sandy loam soil and between 28 to 59 kg N ha⁻¹ on the clay soil (Table 3.4). Based on N uptake, NFRV ranged between 65 and 84 kg N ha⁻¹ at Saint-Anselme and between 27 and 57 kg N ha⁻¹ at Saint-Nicolas. At both sites, NFRV of one year alfalfa var. Nitro were larger with hybrid P3979 compared to hybrids NK0565 and P3962.

Effects of alfalfa as first-year crop in the rotation on NFRV were limited in 1994. Based on grain yield, mean NFRV were 9 kg N ha⁻¹ on the sandy loam soil and 4 kg N ha⁻¹ on the clay soil. On N uptake basis, mean NFRV were 12 and 3 kg N ha⁻¹ on the sandy loam soil and the clay soil, respectively.

Nitrogen use efficiency

The sandy loam soil was the most suited for corn production. Only data from this site will be presented and discussed. On the clay soil however, at each N rate, physiological efficiency (PE) was not affected by the rotation and hybrids differed for recovery and yield efficiencies (RE and YE) on the cumulative basis (data not shown).

Year 1993

At 60 kg N ha⁻¹, the rotation significantly affected physiological and yield efficiencies on both incremental and cumulative bases and recovery efficiency on the cumulative basis (Tables 3.5 and 3.6). These efficiency values were larger in corn monoculture compared to the rotation.

At 120 kg N ha⁻¹, hybrid differences were observed for PE on the cumulative basis (H, Tables 3.5. and 3.6). The PE was lower for hybrid Pioneer 3979 compared to hybrid Northrup King 0565. The RE on an incremental basis and RE, PE and YE on a cumulative basis were lower in the rotation compared to the monoculture.

At 180 kg N ha⁻¹, the RE, PE and YE on a cumulative basis were lower in the rotation compared to the monoculture (FYC, Tables 3.5. and 3.6).

Year 1994

The efficiency values were not affected by hybrid or rotation at 60 kg N ha⁻¹. Differences were not observed for RE, PE and YE on an incremental basis at 120 and 180 kg N ha⁻¹.

At 120 kg N ha⁻¹, hybrid differences were observed for yield efficiency on a cumulative basis (H, Tables 3.7 and 3.8). The yield efficiency was larger for hybrid P3979 than for hybrid P3962. The RE on the cumulative basis was larger under continuous corn compared to the rotation (FYC, Tables 3.7 and 3.8).

At 120 and 180 kg N ha⁻¹, the PE was affected by hybrid differences. The PE of hybrid P3979 was larger compared to that of hybrids NK0565 and P3962 (FYC, Tables 3.7 and 3.8). The YE was lower in the rotation compared to the corn monoculture.

Nitrogen harvest index

Year 1993

The nitrogen harvest index (NHI) was affected by hybrid differences at both sites (H, Tables 3.9 and 3.10). The NHI of hybrid P3979 was larger than that of NK0565 and P3962. At both sites also, differences in NHI were observed between monoculture and rotation corn (FYC, Tables 3.9 and 3.10).

Year 1994

No rotation effect on corn NHI was observed two years after alfalfa (FYC not significant, Tables 3.9 and 3.10). Hybrid differences were observed for NHI. On the sandy loam soil, the NHI of hybrid P3979 was larger than that of NK0565 and P3962. On the clay soil the NHI of hybrids P3979 and NK0565 were similar but higher compared to that of P3962.

DISCUSSION

Grain and stover N concentrations and uptake increased with N rates at both sites. Increasing N fertilizer rates may increase grain quality by increasing grain N protein. The N uptake and N concentrations were larger after alfalfa. The effect of previous alfalfa was most apparent at the lower N rates where soil N availability was probably the primary factor limiting corn yields and N uptake. Similar results were obtained in Pennsylvania by Fox and Piekielek (1988). During the first year following alfalfa and other legumes, they observed significantly larger corn N uptake in all rotations containing a legume compared to continuous corn at the two lower N rates (0 and 50 kg N ha⁻¹).

In this experiment, yields were affected by corn maturity. However, maturity differences among corn hybrids are not necessarily related to differences in N concentrations in corn tissues. Compared to P3979, hybrid P3962 had larger N content in the stover but less in the grain. Both stover N yield and N concentration of P3962 were larger compared to those of P3979.

The difference in grain and stover N concentration among hybrids is a genetic character (Reed et al., 1980). It may also be a result of differences in plant physiology in relation to the environment (Gardner et al., 1990). Hybrid P3962 may be slower in the

redistribution of absorbed N from the stover to the grains before the first killing frost. This may have resulted in lower N concentration in the grain but larger in the stover. Robin (1984) observed that genotypes with high nitrate reductase activities and low proteolytic activities have low grain N concentration and a low capacity to remobilize N from the vegetative organs.

In our experiment, the difference method failed to express N credits for previous alfalfa. This may be a result of potential maximum yield with preceeding alfalfa being similar to potential maximum yield in corn monoculture (Lory et al., 1995b). In such case, differences between the rotation and continuous corn may be mainly due to residual N or conserved soil N by alfalfa rather than non-N rotation effects. One year of alfalfa may have been too short for non-N rotation effects to occur in our experimental conditions.

The higher NFRV on the sandy loam soil compared to the clay soil can be partially explained by better alfalfa stands. On the average, alfalfa dry matter yields were 2784 kg N ha⁻¹ on the clay soil compared to 3694 kg N ha⁻¹ on the sandy loam soil. Based on these figures, we hypothesize that more alfalfa biomass as crown and roots was plowed down on the sandy loam soil compared to the clay soil. Other possible reasons for lower NFRV at Saint-Nicolas could be lower residue N mineralization or greater physical sequestration of N in soil aggregates (Chantigny, 1995). Also, higher denitrification potential have been determined on the clay soil (Chantigny, 1995). On the sandy loam soil, our estimates of NFRV (78 to 106 kg N ha⁻¹) were larger than the 40 to 70 kg N ha⁻¹ currently recommended for alfalfa roots and crowns plowdown in the province of Quebec (CPVQ Inc, 1994).

On a nearby site on the sandy loam soil, Paré et al. (1992 and 1993) determined NFRV following one or two years of legumes. Based on dry matter yields, they observed that NFRV of one year of soybean (*Glycine max* [L.] Merr.) were negligible but larger than 150 kg N ha⁻¹ for faba bean (*Vicia faba* L.). Two years of consecutive faba bean did not

result in higher NFRV which ranged between 60 and 125 kg N ha⁻¹ while NFRV of two years of soybean averaged 14 kg N ha⁻¹.

Compared to our results, one year of non dormant alfalfa was similar to one or two years of faba bean and more effective compared to one or two years of soybean in supplying N to corn. The NFRV of alfalfa var. Nitro for grain-corn production was also dependent on corn hybrids. NFRV of alfalfa were larger for Hybrid P3979 and NK0565. These hybrids had the lower CHU requirements and were the most adapted to the environment. They have taken more advantage of available N from the previous alfalfa crop.

The different ways of characterizing NUE, i.e., physiological efficiency, N recovery efficiency and yield efficiency allowed several comparisons of hybrids and crop successions involved within each N rate. Yield efficiency was lower after alfalfa than after corn. Much of the N absorbed remained in the vegetative material rather than in the grain. Moll et al. (1982) found significant interactions among corn hybrids and N levels; at low N supply, differences among hybrids for yield efficiency were attributed to variations in utilization of accumulated N, but with high N, they were attributed to variations in uptake efficiency. In contrast, Bundy and Carter (1988) observed that yield efficiency was similar for the seven 95 to 110-day relative maturity corn hybrids studied.

In grain-corn production, there is considerable advantage for increasing grain yield relative to the quantity of N recovered (physiological efficiency). The potential for increasing the fraction of recovered N translocated from the stover to the grain was much higher with hybrid P3979 compared to the other hybrids. This suggests that hybrid P3979 is more effective in using N from fertilizer in the 2300 to 2500 CHU area in Eastern Quebec compared to hybrids NK0565 and P3962. Our N recovery data suggest that the higher physiological efficiency of hybrid P3979 appears to be related to factors such as translocation, assimilation and redistribution rather than larger N absorption of fertilizer N.

When the stover is returned to the soil in grain-corn production, differences in N recovery efficiency from grain yields may have implications for the fate of N in the environment. Within each N rate, our hybrids were similar for N recovery efficiency. Other studies have observed differences in N recovery efficiency among corn hybrids and more N was lost under low efficient hybrids. These differences were attributed to the root density which affect the distance between N and the roots or to a lower rate of N absorption by roots (Bock, 1984). Research in Indiana (MacKay and Barber, 1986) explained hybrid differences by differences in hybrid root growth.

Conclusions

Grain and stover N concentrations and uptake increased linearly with fertilizer N rates at both sites. Corn N uptake pattern is an important consideration for the choice of the most suitable method for the determination of previous alfalfa N credits. In particular, when the rotation effects of the legume crop are mainly due to N input in the system such as in this study, the method based on fertilizer-N equivalence is the most suited.

On the sandy loam soil, one year of alfalfa produced corn yields that could be obtained by the application of 78 to 106 kg N ha⁻¹. On clay soil, the fertilizer-N equivalence for one year alfalfa was only 28 to 59 kg N ha⁻¹. Plowing down roots and crowns of one year alfalfa was as effective in supplying N to following corn compared to what was previously reported for two years of faba bean and more effective than two years of soybean. However, the second corn crop after one-year alfalfa benefited of limited N-rotation effects. It should then be advisable to not account any N credit for previous alfalfa on the second corn crop in the rotation.

The amounts of N introduced in the system by the alfalfa crop affected the fertilizer N use by following corn. For all hybrids the yield efficiency decreased with increasing N levels. The physiological efficiency was much higher for hybrid Pioneer 3979. However,

its N recovery efficiency at high N levels was not the best. This study demonstrate a large potential to improve corn N use efficiency and N partitioning efficiency through hybrid choice and crop successions.

From this study, it can be said that site specific experiments are needed for a more accurate determination of N credits of preceeding alfalfa in rotation with corn. Fertilizer N recommendations should not ignore hybrid characteristics and preceeding crops in rotations. The development of management practices for newly developed corn hybrids should be considered.

The fertilizer-N equivalences determined for one year alfalfa var. Nitro do not specify the origin of N in the following corn crop. The use of N tracer may help to determine the proportions and amounts of N derived from the fertilizer and those from alfalfa residues or soil conserved N by the alfalfa crop.

Table 3.1. Summary of the analyses of variance for corn tissue N concentrations on the sandy loam soil (at Saint-Anselme) and on the clay soil (at Saint-Nicolas) in 1993 and 1994

Sources of variation	df	Sandy loam soil				Clay soil			
		1993		1994		1993		1994	
		Grain	Stover	Grain	Stover	Grain	Stover	Grain	Stover
----- mean squares (x 10 ⁻²) -----									
Rep ^z	3	3.1	6.5	9.7	1.5	8.8	1.0	112.6 ***	4.4
Nitrogen (N)	3	50.4 ***	74 ***	46.7 **	62.7 ***	40.6 ***	53.1 ***	82.3 ***	31 **
N _L ^y	1	141 ***	207 ***	97.9 **	179 ***	110 ***	141 ***	233 ***	85.2 ***
N _o ^x	1	6.2	10.4	1.1	1.5	11.5	18.5 **	6.3	5.8
Error (a)	9	2.4	2.3	5.5	0.5	2.5	1.3	5.0	2.7
Hybrids (H)	2	11.7 ***	5.6 ***	16.8 **	1.4	2.9	2.0 *	1.1	2.5 **
NK0565 ^w vs P3979 ^v	1	0.4	9.6 ***	1.3	2.1	0.7	0.01	0.2	0.3
P3979 vs P3962 ^u	1	14.8 **	0.2	18.9 *	2.1	5.8	3.1 *	2.2	2.6 *
N x H	6	0.3	1.1	10.2 *	0.2	1.7	0.7	7.2	0.9
N _L x (NK0565 vs P3979)	1	0.1	1.7	47.8 ***	0.01	4.6	0.04	19.9 *	1.2
N _L x (P3979 vs P3962)	1	0.1	0.2	29.6 **	0.5	1.9	0.9	12.6	1.1
Error (b)	24	1.1	0.5	2.3	0.8	2.7	0.6	3.5	0.4
First-year crop (FYC)	1	28.9 ***	57.2 **	0.1	0.4	10.3 **	19.3 ***	0.1	0.3
N x FYC	3	7.3 **	5.4 ***	0.3	0.5	3.5	2 *	0.3	0.07
N _L x FYC	1	17.5 ***	9.6 ***	0.9	0.3	10 *	1.3	0.06	0.1
Error (c)	36	1.1	0.7	1.6	0.5	1.4	0.5	1.7	0.4

^z : Replicates

^y : Linear effect of N

^x : Quadratic effect of N

^w : Northrup King 0565

^v : Pioneer 3979

^u : Pioneer 3962

*, **, ***: Significant at the 0.05, 0.01 and 0.001 probability levels respectively.

Table 3.2. N concentrations (%) of grain and stover of second-year corn hybrids (Northrup King 0565, Pioneer 3979 and Pioneer 3962) grown in monoculture or after first-year alfalfa and receiving N fertilizer on the sandy loam and clay soils in 1993 and 1994

1st-year crop in 1992	Crop in 1993 and in 1994	N rates (kg ha ⁻¹)	Sandy loam soil				Clay soil			
			1993		1994		1993		1994	
			Grain	Stover	Grain	Stover	Grain	Stover	Grain	Stover
NK0565 ^z	NK0565	10	1.08	0.56	1.45	0.55	0.97	0.52	1.19	0.48
NK0565	NK0565	60	1.16	0.67	1.51	0.54	1.16	0.70	1.25	0.44
NK0565	NK0565	120	1.39	0.99	1.95	0.82	1.35	0.81	1.53	0.49
NK0565	NK0565	180	1.49	1.02	1.91	0.86	1.40	0.83	1.68	0.66
Alfalfa ^y	NK0565	10	1.28	0.76	1.48	0.54	1.10	0.61	1.17	0.49
Alfalfa	NK0565	60	1.42	0.89	1.43	0.58	1.33	0.87	1.28	0.44
Alfalfa	NK0565	120	1.49	1.08	1.79	0.73	1.35	0.89	1.55	0.58
Alfalfa	NK0565	180	1.51	1.12	1.78	0.86	1.39	1.05	1.70	0.64
P3979 ^x	P3979	10	1.10	0.50	1.47	0.48	1.10	0.55	1.34	0.47
P3979	P3979	60	1.20	0.61	1.46	0.51	1.19	0.67	1.31	0.42
P3979	P3979	120	1.43	0.91	1.64	0.67	1.25	0.87	1.41	0.58
P3979	P3979	180	1.49	0.91	1.66	0.85	1.44	0.91	1.55	0.63
Alfalfa	P3979	10	1.24	0.71	1.71	0.54	1.22	0.62	1.31	0.44
Alfalfa	P3979	60	1.35	0.88	1.62	0.57	1.35	0.83	1.42	0.45
Alfalfa	P3979	120	1.44	1.01	1.72	0.74	1.34	0.90	1.53	0.59
Alfalfa	P3979	180	1.44	0.95	1.61	0.83	1.33	0.93	1.56	0.72
P3962 ^w	P3962	10	0.94	0.53	1.33	0.52	0.95	0.49	1.09	0.44
P3962	P3962	60	1.05	0.61	1.42	0.53	1.18	0.66	1.34	0.48
P3962	P3962	120	1.40	0.86	1.66	0.80	1.31	0.88	1.70	0.65
P3962	P3962	180	1.33	0.97	1.59	0.87	1.31	0.83	1.53	0.77
Alfalfa	P3962	10	1.19	0.70	1.36	0.51	1.10	0.62	1.10	0.46
Alfalfa	P3962	60	1.28	0.93	1.41	0.59	1.19	0.81	1.30	0.48
Alfalfa	P3962	120	1.35	0.93	1.72	0.76	1.37	0.84	1.54	0.62
Alfalfa	P3962	180	1.39	1.04	1.72	0.9	1.33	0.82	1.54	0.74

^z : Northrup King 0565

^y : Alfalfa var. Nitro

^x : Pioneer 3979

^w : Pioneer 3962

Table 3.3. Summary of the analyses of variance for corn N uptake on the sandy loam soil (at Saint - Anselme) and on the clay soil (at Saint-Nicolas) in 1993 and 1994

Sources of variation	df	Sandy loam soil				Clay soil			
		1993		1994		1993		1994	
		Grain	Stover	Grain	Stover	Grain	Stover	Grain	Stover
		----- mean squares -----							
Rep ^z	3	178	346	335	91 *	207	16	4462 **	125
Nitrogen (N)	3	6760 ***	4079 ***	19210 ***	4849 ***	3679 ***	2656 ***	22585 ***	3289 ***
N _L ^y	1	20008 ***	11558 ***	55613 ***	14280 ***	8893 ***	6718 ***	63103 ***	9805 ***
N _Q ^x	1	273	565	767	54	2061 ***	1152 *	4518 **	60
Error (a)	9	262	124	171	13	94	84	343	95
Hybrids (H)	2	448 **	608 ***	1151 ***	294 **	66	146 **	196	582 ***
NK0565 ^w vs P3979 ^v	1	562 *	397 **	158	46	11	89	380	68
P3979 vs P3962 ^u	1	767 **	1206 ***	2150 ***	554 ***	61	291 **	165	601 ***
N x H	6	10	97 *	168 *	45	94	44	263	67 *
N _L x (NK0565 vs P3979)	1	0.4	369 **	639 **	14	290	109 *	220	40
N _L x (P3979 vs P3962)	1	7	264 *	7	127	85	2	66	148 *
Error (b)	24	76	37	60	37	96	26	149	20
First-year crop (FYC)	1	5070 ***	5230 ***	556 **	82 *	1485 ***	1580 ***	587 **	27
N x FYC	3	894 ***	485 ***	38	9	380 ***	149 ***	71	0.6
N _L x FYC	1	2480 ***	1230 ***	44	3	1108 ***	283 ***	22	0.2
H x FYC	2	9	6	162 *	12	24	33	56	11
(NK0565 vs P3979)xFYC	1	14	10	268 *	10	0.5	57	11	1
Error (c)	36	58	30	49	15	42	20	71	11

^z : Replicates

^y : Linear effect of N

^x : Quadratic effect of N

^w : Northrup King 0565

^v : Pioneer 3979

^u : Pioneer 3962

*, **, *** : Significant at the 0.05, 0.01 and 0.001 probability levels respectively.

Table 3.4. Estimated N fertilizer replacement values (NFRV) in kg N ha⁻¹ of one year non dormant alfalfa for corn production on the sandy loam soil (at Saint-Anselme) and on the clay soil (at Saint-Nicolas) in 1993 and 1994.

Crop in year 1992 - 1993 - 1994	Dry-matter yield basis				N uptake basis			
	Sandy loam		Clay		Sandy loam		Clay	
	Grain	Stover	Grain	Stover	Grain	Stover	Grain	Stover
	kg N ha ⁻¹							
Alfalfa ^z - NK0565 ^y	82	102	28	54	84	65	27	28
Alfalfa - P3979 ^x	106	180	44	180	80	105	57	47
Alfalfa - P3962 ^w	78	97	59	58	65	77	45	37
Mean	89	126	44	97	76	82	43	37
Alfalfa - NK0565 - NK0565	3	0	7	7	6	5	5	12
Alfalfa - P3979 - P3979	9	10	0	0	18	20	0	0
Alfalfa - P3962 - P3962	14	8	6	4	13	8	5	5
Mean	9	6	4	4	12	11	3	6

^z : Alfalfa var. Nitro

^y : Northrup King 0565

^x : Pioneer 3979

^w : Pioneer 3962.

Table 3.5. Summary of the analyses of variance of N use efficiency values for three corn hybrids as affected by N rate and first-year crop on the sandy loam soil (at Saint-Anselme) in 1993.

Sources of variation	df	Nitrogen use efficiency					
		Incremental basis			Cumulative basis		
		RE	PE	YE	RE	PE	YE
60 kg N ha⁻¹							
Rep ^z	3	106	3504	222	74	3506	161
Hybrid (H)	2	263	757	140	182	761	135
Ea	6	472	1036	176	328	1038	132
First-year crop (FYC)	1	1183	7136 *	1960 *	821 *	7153 *	1515 ***
Eb	7	206	670	23	143	664	36
120 kg N ha⁻¹							
Rep ^z	3	206	789	66	100	72	32
Hybrid (H)	2	59	2677	120	14	354 *	0.5
NK0565 ^y vs P3979 ^x	1	82	809	10	20	659 *	0.9
Ea	6	432	1402	90	113	63	14
First-year crop (FYC)	1	2934 *	1104	37	2174 **	970 *	779 ***
Eb	8	263	672	17	112	179	11
180 kg N ha⁻¹							
Rep	3	1859	1852	316	294 **	707	58
Hybrid (H)	2	112	1150	115	7	341	13
Ea	6	497	1435	147	23	323	15
First-year crop (FYC)	1	24	907	20	1078 ***	3853 *	415 ***
Eb	8	540	901	42	22	835	3

^z : Replicates

^y : Northrup King 0565

^x : Pioneer 3979

Table 3.6. Nitrogen use efficiency values for three corn hybrids as affected by N rate and previous crop on the sandy loam soil (at Saint-Anselme) in 1993.

Nitrogen use efficiency														
N rate (kg ha ⁻¹)	Incremental basis						Cumulative basis							
	RE ^z		PE ^y		YE ^x		RE		PE		YE			
	C-C	A-C	C-C	A-C	C-C	A-C	C-C	A-C	C-C	A-C	C-C	A-C		
	%		kg grain kg N ⁻¹				%		kg grain kg N ⁻¹					
Northrup King 0565														
60	30.1	34.8	62.3	9.7	20.7	9.1	25.1	28.9	62.3	9.7	17.3	7.6		
120	36.8	7.5	35.9	47.5	14.1	2.9	30.9	15.5	53.5	47.3	15.7	4.6		
180	26.3	12.5	55.2	40.4	12.1	7.2	29.4	13.2	50.2	11.4	14.5	4.5		
Pioneer 3979														
60	43.2	9.9	77.3	46.4	30.0	4.2	35.9	8.2	77.3	46.4	25.0	0.0		
120	32.5	20.6	26.4	40.6	9.2	8.5	34.2	14.4	50.7	24.1	17.1	3.6		
180	21.4	11.0	19.8	38.8	7.5	6.8	31.1	13.3	48.2	36.3	14.4	4.7		
Pioneer 3962														
60	43.1	30.3	81.8	44.7	34.1	13.6	35.9	25.2	81.8	44.7	28.4	11.3		
120	35.6	7.9	8.7	11.6	2.9	2.8	35.8	13.4	44.8	35.7	15.6	4.9		
180	13.5	22.2	32.5	60.7	14.9	12.9	28.3	16.4	55.5	27.9	15.4	7.6		

^z : Recovery efficiency

^y : Physiological efficiency

^x : Yield efficiency

A-C : First-year alfalfa and second year corn

C-C : Continuous corn.

Table 3.7. Summary of the analyses of variance of N use efficiency values for three corn hybrids as affected by N rate and first-year crop on the sandy loam soil (at Saint-anse) in 1994.

Sources of variation	df	Nitrogen use efficiency					
		Incremental basis			Cumulative basis		
		RE	PE	YE	RE	PE	YE
60 kg N ha⁻¹							
Rep ^z	3	1396	2788	163	1106	3723	113
Hybrid (H)	2	46	1953	159	51	3209	111
Ea	6	560	2038	108	328	2023	76
First-year crop (FYC)	1	104	12052	45	13	9466	31
Eb	9	481	11309	73	329	11434	50
120 kg N ha⁻¹							
Rep	3	345	38	69	499	383	64
Hybrid (H)	2	669	708	98	146	1590	104 **
P3979 ^y vs P3962 ^x	1	19	736	194	4	2036	207 **
Ea	6	290	196	45	86	767	9
First-year crop (FYC)	1	8	15	1	903 **	44	7
Eb	9	467	63	57	67	70	5
180 kg N ha⁻¹							
Rep	3	674	2523	102	130	177	5
Hybrid (H)	2	497	5155	20	227	711 *	19
NK0565 ^w vs P3979	1	586	8057	29	379	1301 **	9
P3979 vs P3962	1	776	6063	26	235	570 *	38
Ea	6	559	4845	68	219	87	8
First-year crop (FYC)	1	1123	7449	150	1098 **	7	8 *
Eb	6	307	4301	22	65	27	1

^z : Replicates

^y : Pioneer 3979

^x : Pioneer 3962

^w : Northrup King 0565.

Table 3.8. Nitrogen use efficiency values for three corn hybrids as affected by N rate and previous crop on the sandy loam soil (at Saint-Anselme) in 1994

N rates (kg N ha ⁻¹)	Nitrogen use efficiency											
	Incremental basis						Cumulative basis					
	RE ^z %		PE ^y		YE ^x		RE %		PE		YE	
	C-C-C	A-C-C	C-C-C	A-C-C	C-C-C	A-C-C	C-C-C	A-C-C	C-C-C	A-C-C	C-C-C	A-C-C
	%		kg grain kg N ⁻¹				%		kg grain kg N ⁻¹			
Northrup King 0565												
60	36.8	36.6	63.9	87.7	22.5	27.5	30.7	30.8	64.0	87.7	18.8	22.9
120	68.6	61.8	29.2	33.7	20.2	19.7	49.6	54.8	38.7	46.4	19.5	21.3
180	25.6	29.2	73.8	42.8	15.9	13.3	41.6	61.7	45.0	45.0	18.3	18.2
Pioneer 3979												
60	32.4	38.0	149.7	7.6	30.4	27.2	27.0	26.9	149.7	7.6	25.3	22.7
120	48.1	53.0	47.5	51.6	21.3	26.6	37.5	53.2	67.5	69.5	23.3	24.6
180	24.8	2.3	26.9	1.0	13.9	8.9	33.3	48.0	61.9	67.7	20.2	19.4
Pioneer 3962												
60	28.5	35.5	112.2	111.4	16.7	23.1	23.7	28.1	112.2	111.4	13.9	19.2
120	49.1	47.6	37.9	34.1	19.6	14.4	36.4	52.4	46.6	45.2	16.8	16.8
180	31.3	16.0	68.2	27.6	17.3	9.7	31.0	57.6	50.0	48.9	15.5	14.4

^z : Recovery efficiency

^y : Physiological efficiency

^x : Yield efficiency

A-C-C : First-year alfalfa, second and third year corn

C-C-C : Corn monoculture.

Table 3.9. Summary of the analyses of variance for corn nitrogen harvest index (NHI) on the sandy loam soil (at Saint-Anselme) and on the clay soil (at Saint-Nicolas) in 1993 and 1994.

Sources of variation	df	Sandy loam soil		Clay soil	
		1993	1994	1993	1994
		----- mean squares -----			
Rep ^z	3	181	51	47	83
Nitrogen (N)	3	59	50	71	47
Error (a)	9	49	29	26	29
Hybrids (H)	2	387 ***	375 ***	87 **	251 ***
NK0565 ^w vs P3979 ^v	1	308 ***	91 **	18	0.01
P3979 vs P3962 ^u	1	754 ***	728 ***	168 ***	377 ***
N x H	6	12	17	13	16
Error (b)	24	19	9	18	7.2
First-year crop (FYC)	1	206 ***	0.01	66 *	1.9
N x H x FYC	6	19	3.7	18	7.2
Error (c)	36	15	7	13	5.7

^z : Replicates

^w : Northrup King 0565

^v : Pioneer 3979

^u : Pioneer 3962

*, **, ***: Significant at the 0.05, 0.01 and 0.001 probability levels respectively.

Table 3.10. N harvest index of three corn hybrids (Northrup King 0565, Pioneer 3979 and Pioneer 3962) grown in monoculture or after first-year alfalfa in 1993 and 1994.

Hybrids	Sandy loam soil			Clay soil		
	1993		1994	1993		1994
	Monoculture	Rotation		Monoculture	Rotation	
Northrup King 0565	61.22	58.33	71.07	62.71	59.67	77.18
Pioneer 3979	66.29	62.05	73.46	63.15	61.35	77.17
Pioneer 3962	58.12	56.48	66.71	59.08	58.94	72.31

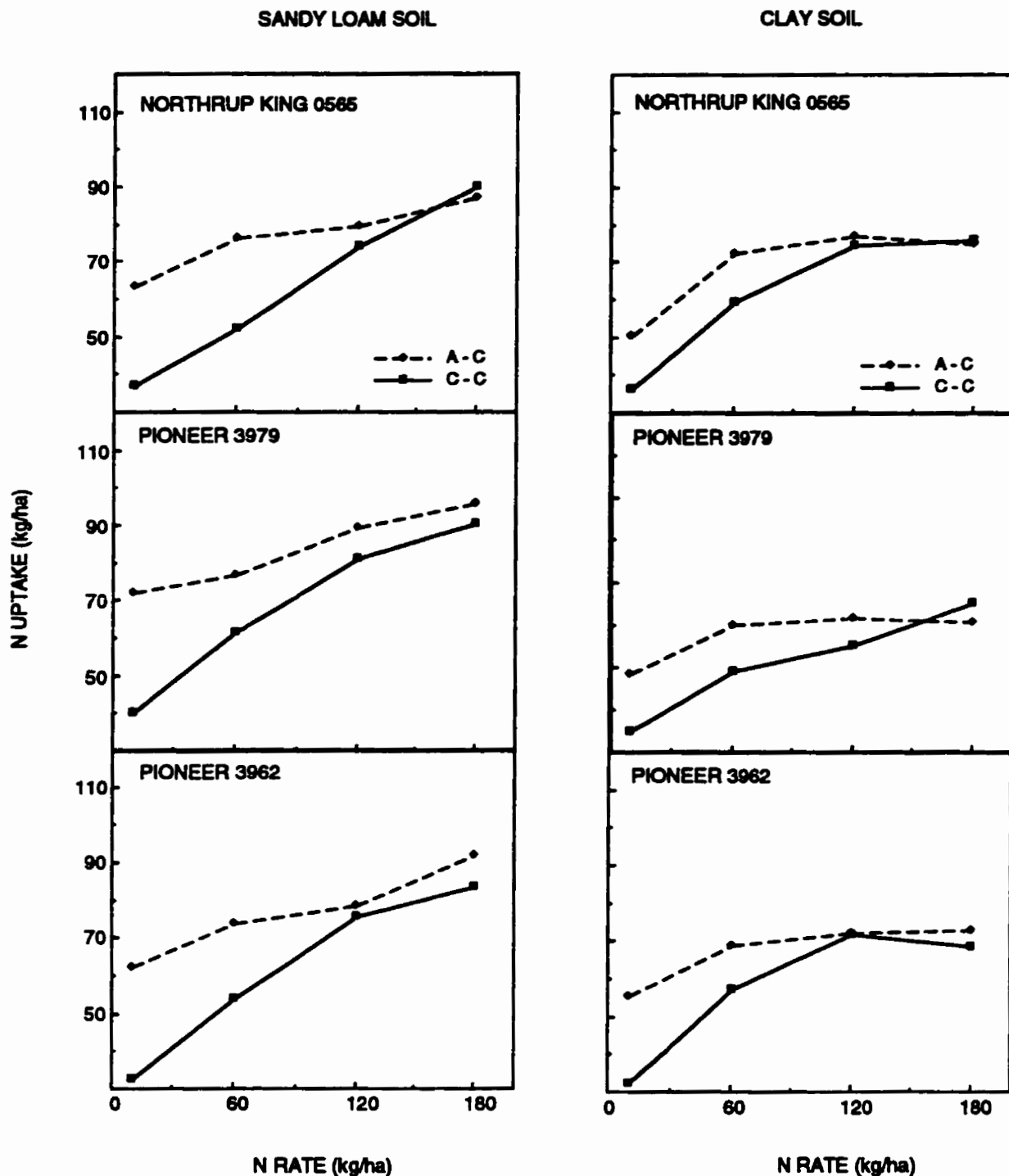


Figure 3.1. Grain N uptake of three early corn hybrids (Northrup King 0565, Pioneer 3979 and Pioneer 3962) after first-year corn (C - C) or first-year non-dormant alfalfa (A-C) on the sandy loam soil (at Saint-Anselme) and on the clay soil (at Saint-Nicolas) in 1993.

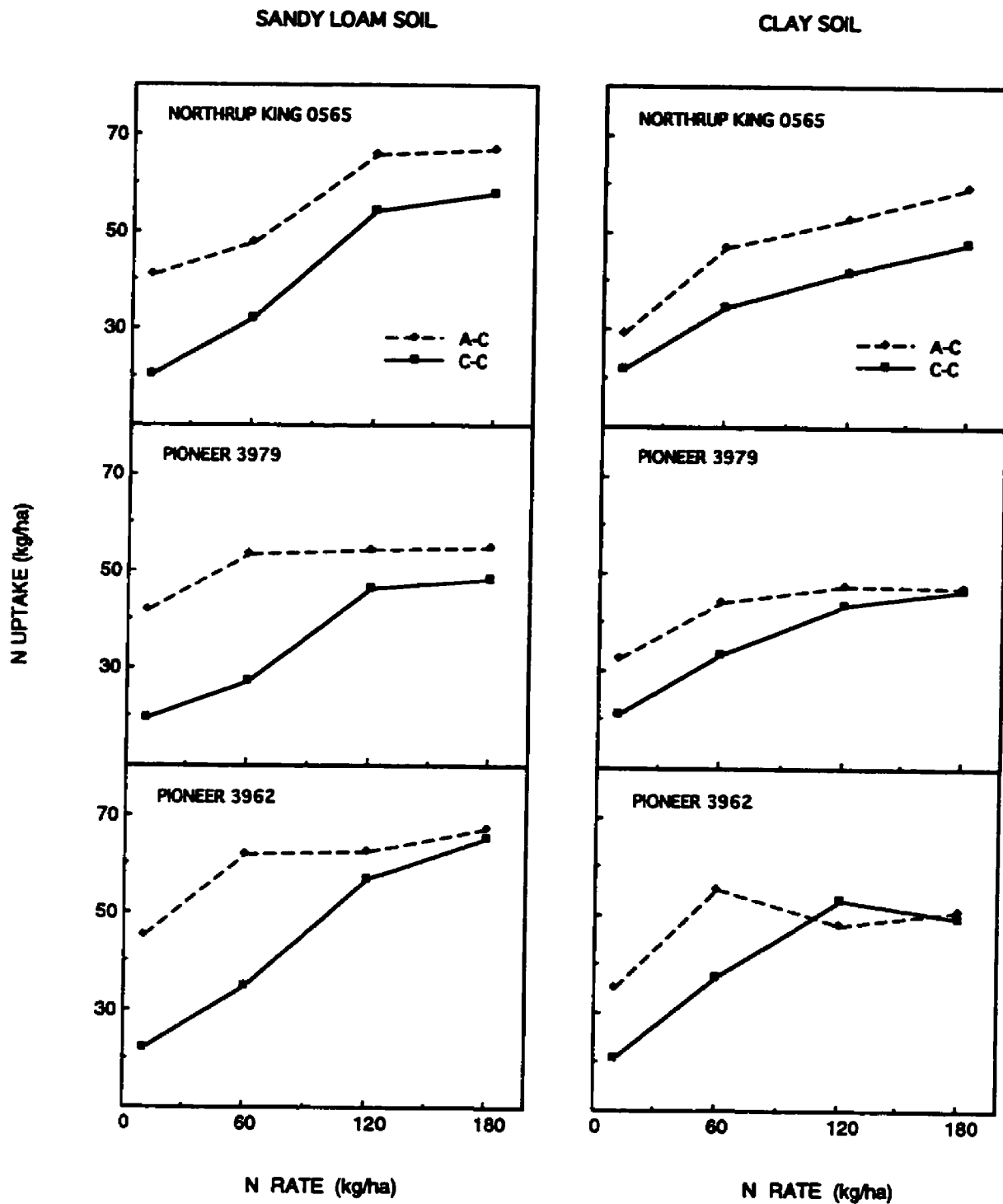


Figure 3.2. Stover N uptake of three early corn hybrids (Northrup King 0565, Pioneer 3979 and Pioneer 3962) after first-year corn (C-C) or first-year non-dormant alfalfa (A-C) on the sandy loam soil (at Saint-Anselme) and on the clay soil (at Saint-Nicolas) in 1993.

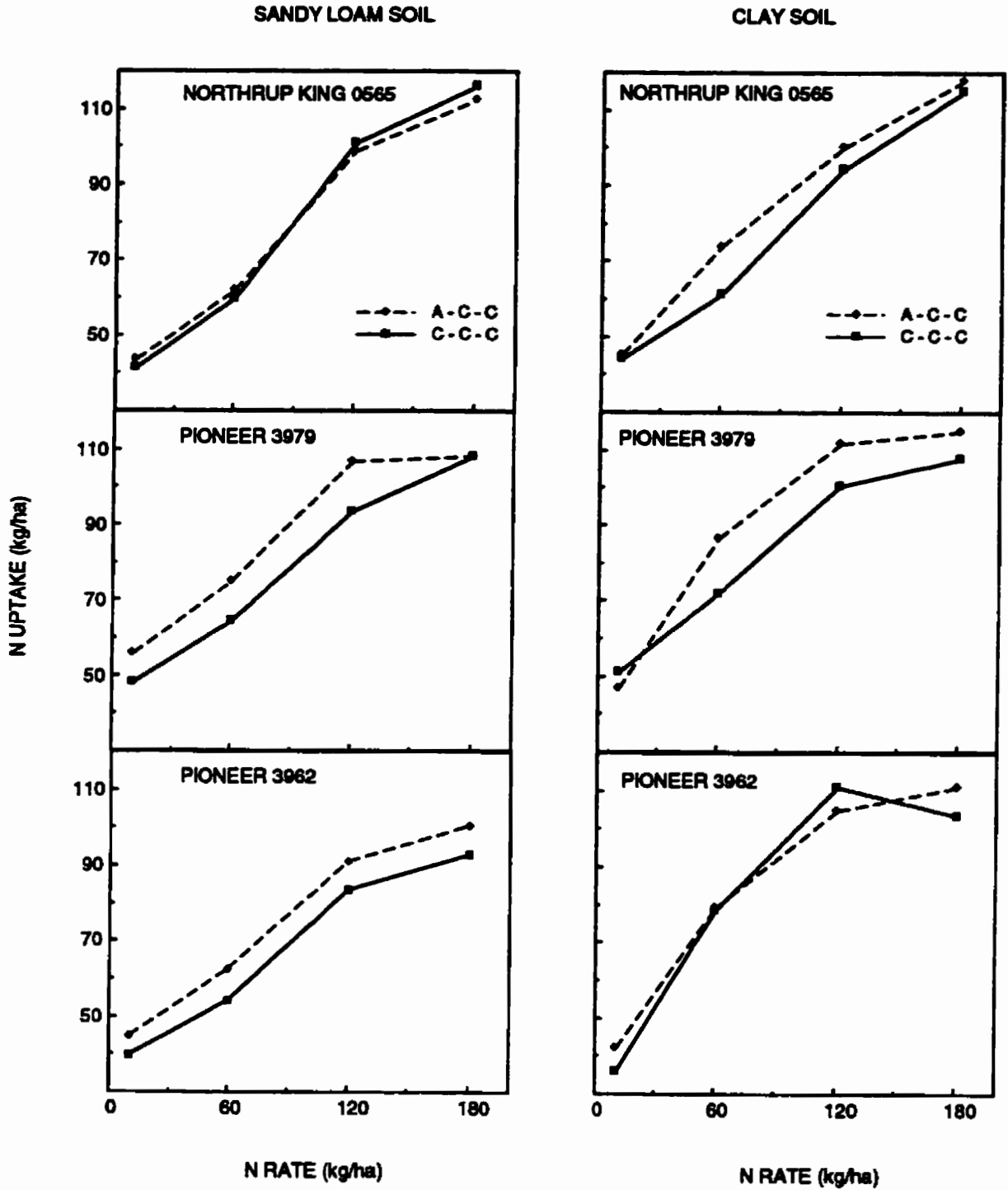


Figure 3.3. Grain N uptake of three early corn hybrids (Northrup King 0565, Pioneer 3979 and Pioneer 3962) after first-year corn (C - C - C) or first-year non-dormant alfalfa (A - C - C) on the sandy loam soil (at Saint-Anselme) and on the clay soil (at Saint - Nicolas) in 1994.

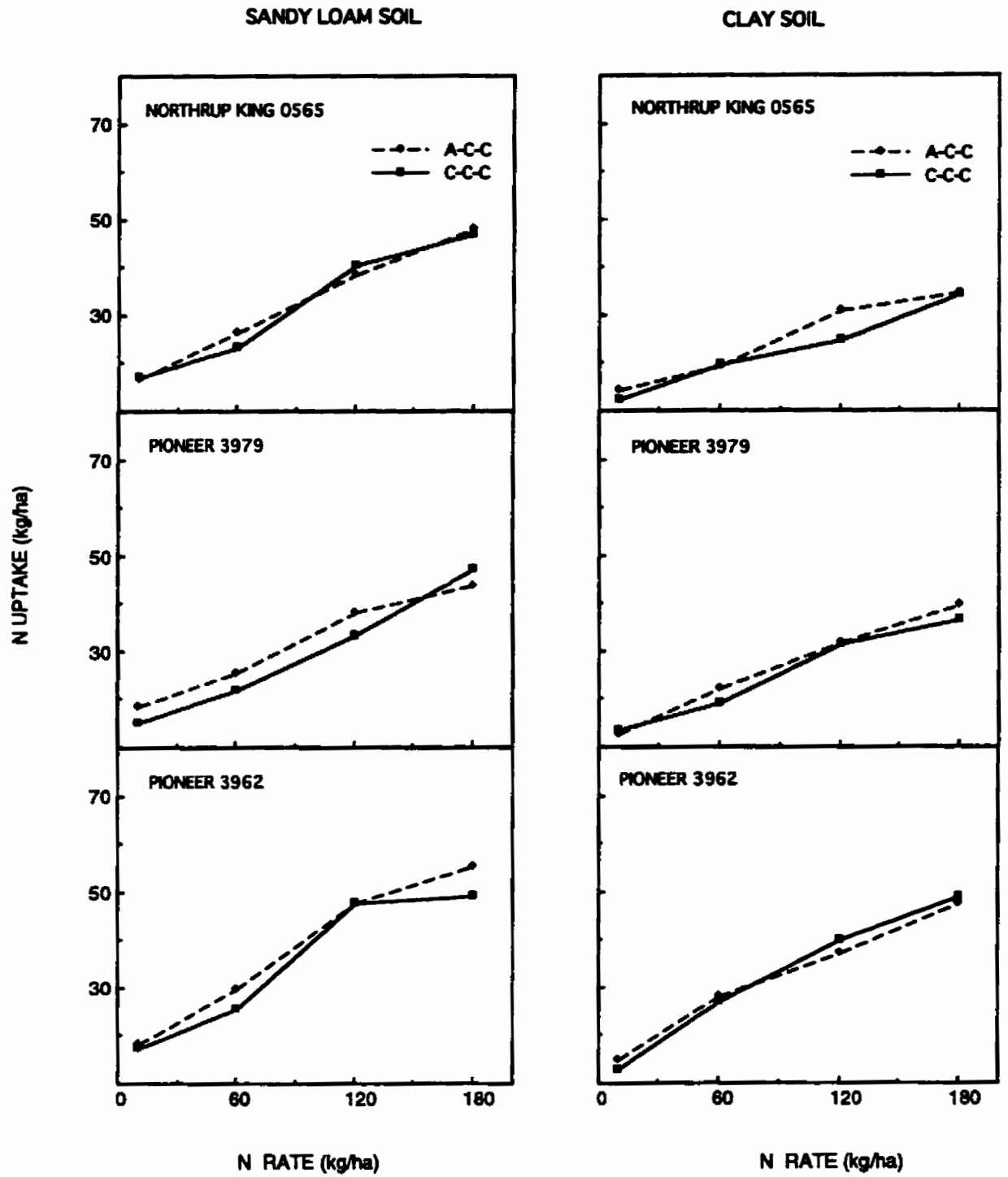


Figure 3.4. Stover N uptake of three early corn hybrids (Northrup King 0565, Pioneer 3979 and Pioneer 3962) in monoculture (C-C-C) or after first-year alfalfa (A-C-C) on the sandy loam soil (at Saint-Anselme) and on the clay soil (at Saint-Nicolas) in 1994.

References

Barnett, G. 1996. Historique de la fertilisation des sols au Québec. Pages 7 - 18, dans: Colloque sur la fertilisation intégrée des sols. Cahier de conférences. Conseil des Productions Végétales du Québec. 257p.

Bock, B.R. 1984. Efficiency use of nitrogen in cropping systems. Pages 273-294, dans: R.D. Hauck (ed.) Nitrogen in crop production. ASA-CSSA-SSSA, Madison, WI.

Bruuslema, T.W. and B.R. Christie. 1987. Nitrogen contribution to succeeding corn from alfalfa and red clover. Agron. J. 79:96-100.

Bundy, L.G. and P.R. Carter. 1988. Corn hybrid response to nitrogen fertilization in the northern Corn Belt. J. Prod. Agric. 1: 99-104.

Bundy L.G., T.W. Andraski and R.P. Wolkowski. 1993. Nitrogen credits in soybean-corn crop sequences on three soils. Agron. J. 85:1061-1067.

Campbell, C.A., F. Selles, R.P. Zentner and B.G. McConkey. 1993. Nitrogen management for zero-till spring wheat : disposition in plant and utilization efficiency. Commun. Soil Sci Plant Anal. 24: 2223-2239.

Chantigny, M. H. 1995. Evolution de l'activité biologique et de la stabilité structurale du sol sous différents types de culture et de fertilisations azotées. Thèse de doctorat. Université Laval, Sainte-Foy, 120pp.

Conseil des Productions Végétales du Québec (CPVQ). 1994. AGDEX. Grilles de fertilisation. Ministère de l'Agriculture, des pêcheries et de l'alimentation, Québec.

Danso, S.K.A. and I. Papastylianou. 1992. Evaluation of the nitrogen contribution of legumes to subsequent cereals. *J. Agric. Sci.* 119:13-18.

Dhugga, K.S. and J.G. Waines. 1989. Analysis of nitrogen accumulation and use in bread and durum wheat. *Crop Sci.* 29: 1232-1239.

Eaglesham, A.R.J, A. Ayanaba, V. Ranga Rao and D.L. Eskew. 1981. Improving the nitrogen nutrition of maize by intercropping with cowpea. *Soil Biol. Biochem.* 13:169-171.

Fox, R.H. and W.P. Piekielek. 1988. Fertilizer N equivalence of alfalfa, birdsfoot trefoil and red clover for succeeding corn crops. *J. Prod. Agric.* 1:313-317.

Gardner, C.A.C., P.L. Bax, D.J. Bailey, A.J. Cavallieri, C.R. Clausen, G.A. Luce, J.M. Meece, P.A. Murphy, T.E. Piper, R.L. Segebart, O.S. Smith, C.W. Tiffany, M.W. Trimble and B.N. Wilson. 1990. Response of corn hybrids to nitrogen fertilizer. *J. Prod. Agric.* 3: 39-43.

Harris, G.H. and O.B. Hesterman. 1990. Quantifying the nitrogen contribution from alfalfa to soil and two succeeding crops using nitrogen-15. *Agron. J.* 82:129-134.

Heichel, G.H. 1987. Legumes as a source of nitrogen in conservation tillage systems. Pages 29-35, *dans* : J.F. Power (ed.) *The role of legumes in conservation tillage systems.* Soil Conservation Society of America, Ankeny, Iowa.

Kurtz, L.T., L.V. Boone, T.R. Peck and R.G. Hoefft. 1984. Crop rotations for efficient nitrogen use. Pages 295-306, *dans* : R.D. Hauck (ed.) *Nitrogen in crop production.* ASA-CSSA-SSSA, Madison, WI, USA.

Lory J.A., M.P. Russelle and T.A. Peterson. 1995a. A comparison of two nitrogen methods : traditional vs. difference. Agron. J. 87:648-651.

Lory J.A., M.P. Russelle and G. W. Randall. 1995b. A classification system for factors affecting response to nitrogen fertilization. Agron. J. 87:869-876.

Mackay, A.D. and S.A. Barber. 1986. Effect of nitrogen on root growth of two corn genotypes in the field. Agron. J. 78: 699-703.

Major, D.L. and R.I. Hamilton. 1978. Adaptation of corn for whole plant silage in Canada. Can. J. Plant Sci. 63 : 121 - 130.

McKeague, J.A. (ed.) 1978. Manual of soil sampling and methods of analysis. Prepared by Can. Soil Survey Committee. Canadian Society of Soil Science, Ottawa, ON. 250p.

Moll, R.H., E.J. Kamprath and W.A. Jackson. 1982. Analysis and interpretation of factors which contribute to efficiency of nitrogen utilization. Agron. J. 74: 562-564.

Morris, T.F., A.M. Blackmer and N.M. El-Hout. 1993. Optimal rates of nitrogen fertilization for first-year corn after alfalfa. J. Prod. Agric. 6: 344-350.

Paré, T., Chalifour, F.-P., Bourassa, J. and Antoun, H. 1992. Forage-corn dry matters yields and N uptake as affected by previous legumes and nitrogen fertilizer. Can. J. Plant Sci. 72 699-712.

Paré, T., Chalifour, F.-P., Bourassa, J. and Antoun, H. 1993. Residual effects of faba bean and soybean for a second or third succeeding forage-corn production. Can. J. Plant Sci. 73:495-507.

Patra, D.D., Sachdev, M.S. and Subbiah, B.V. 1986. 15N studies on the transfer of legume-fixed nitrogen to associated cereals in intercropping systems. Biol. Fertil. Soils. 2: 165-171.

Pfarr, D.G. 1988. Nitro : A non dormant alfalfa variety for maximum single year production. J. Prod. Agric. 1: 182-183.

Reed, A. J., F.E. Below and R.H. Hageman. 1980. Grain protein accumulation and the relationship between leaf nitrate reductase and proteases activities during grain development in maize (*Zea mays* L.). I. Variation between genotypes. Plant. Physiol., 66 : 1179 - 1183.

Robin, P. 1984. Assimilation du nitrate et remobilisation de l'azote protéique. Pages 241 - 275, dans : A. Gallais (ed). Physiologie du maïs. INRA, Paris.

Statistical Analysis System Institute, Inc. 1989. Sas user's guide : Statistics. 6 th ed., SAS Institute Inc., Cary, NC.

Steel, R.G.D. and J.H. Torrie. 1980. Principles and procedures of statistics : A biometrical approach. McGraw-Hill Publishing Co. NY.

Les chapitres précédents ont permis de décrire les augmentations de rendements résultant de l'inclusion d'une luzerne non dormante (*Medicago sativa* L. var. Nitro) en tête de rotation avec le maïs (*Zea mays* L.). En particulier, au Chapitre III, il a été établi qu'un précédent d'une année de luzerne contribue significativement à la nutrition azotée du maïs-grain subséquent. Cet apport d'azote par la luzerne a été utilisé pour expliquer les rendements plus élevés obtenus dans la rotation. Des valeurs de remplacement en fertilisant azoté (VRFA) de la luzerne cv. Nitro ont pu être déterminées.

Les VRFA ne permettent cependant pas de distinguer la provenance de l'azote (N). De plus, les efficacités d'utilisation d'N calculées au Chapitre III ne tiennent pas compte des autres sources d'azote disponibles. Dans le chapitre suivant, nous avons utilisé une technique de traçage isotopique afin de pouvoir distinguer les proportions et quantités d'N provenant du fertilisant azoté de celles issues des résidus de la luzerne ou de l'N conservé dans le sol par cette dernière. Au préalable cependant, nous avons quantifié les quantités d'N fixées par la luzerne dans nos conditions expérimentales.

Les rendements et les prélèvements d'N des trois hybrides étudiés ont été présentés dans le Chapitre II et le Chapitre III, respectivement. Ces données ont été utilisées pour la détermination des quantités d'N dérivées du fertilisant azoté du chapitre qui suit. L'évaluation de l'efficacité d'utilisation de l'N par la méthode isotopique permet une meilleure appréciation de la quantité réelle de l'N du fertilisant présente dans le maïs par unité d'engrais appliqué.

CHAPITRE IV

SOURCES D'AZOTE ET EFFICACITÉ D'UTILISATION DE L'N D'UN ENGRAIS PAR DU MAÏS HÂTIF EN MONOCULTURE OU EN ROTATION AVEC LA LUZERNE

SOURCES D'AZOTE ET EFFICACITÉ D'UTILISATION DE L'AZOTE D'UN ENGRAIS PAR DU MAÏS HÂTIF EN MONOCULTURE OU EN ROTATION AVEC LA LUZERNE

Résumé

La contribution d'une luzerne annuelle aux besoins en azote du maïs subséquent est influencée par le climat aussi est-il important de l'étudier localement. Les objectifs de la présente étude étaient, à l'aide du marquage isotopique, (i) de déterminer les quantités d' N_2 fixées par la luzerne cv. Nitro (ii) d'estimer les pourcentages et quantités d' N dérivés du fertilisant azoté et ceux dérivés des résidus de luzerne ou de l' N conservé dans le sol et (iii) de déterminer l'efficacité d'utilisation de l' N (EUN) du fertilisant par trois hybrides de maïs en monoculture ou en rotation. Des successions culturales ont été implantées de 1992 à 1994 sur un loam sableux Rivière-du-Loup (Podzol humo-ferrique) et une argile Kamouraska (Gleysol humique). En tête de rotation (en 1992) le maïs et la luzerne étaient présents. Pendant les années subséquentes, le maïs occupait toutes les parcelles. Chaque année, le maïs a reçu 10, 60, 120 ou 180 kg N ha⁻¹. Sur les deux sites, près de 60 % de l' N total de la luzerne provenait de la fixation d' N_2 atmosphérique. Pour le maïs, les pourcentages et quantités d' N provenant du fertilisant azoté ont augmenté avec la dose d' N appliquée de 3 à 63%, soit 3 à 89 kg N ha⁻¹, respectivement, diminuant ainsi l'impact de l' N provenant de la luzerne. Les valeurs observées ont varié en fonction des hybrides et des successions culturales. L'EUN a été plus importante à la dose de 120 kg N ha⁻¹. Les effets de rotation dus à l' N ont été plus marqués en 1993 qu'en 1994. L'utilisation de l' N du fertilisant par la seconde culture de maïs a été favorisée dans la rotation. L'hybride Pioneer 3979 a utilisé moins d' N du fertilisant azoté mais a davantage orienté cet N vers le grain. Les doses de 60 et 120 kg N ha⁻¹ en rotation et 120 kg N ha⁻¹ en monoculture favorisent une meilleure EUN. Une dose plus élevée limite la capacité du maïs à valoriser l' N issu du précédent de luzerne en rotation.

NITROGEN SOURCES AND FERTILIZER N USE EFFICIENCY OF EARLY CORN IN MONOCULTURE OR FOLLOWING ALFALFA

Abstract

The contribution of nondormant alfalfa to corn N needs is climate dependent and must be determined locally. The objectives of this study were (i) to determine seeding year N_2 fixation of a nondormant alfalfa (*Medicago sativa* L. var. Nitro) using ^{15}N isotope dilution and (ii) to estimate proportions and amounts of N derived from N fertilizer (% Ndff and Ndff), proportions and amounts of N derived from alfalfa residues or from N conserved in the soil (% Ndfrc and Ndfrc) and nitrogen use efficiency (NUE) of three short-season corn (*Zea mays* L.) hybrids in monoculture or following alfalfa, using ^{15}N -depleted NH_4NO_3 . Field studies were conducted from 1992 to 1994 on a Rivière-du-Loup sandy loam (Humo-Ferric Podzol) and a Kamouraska clay (Humic gleysol). First-year crops were corn or alfalfa and corn only was present in subsequent years. All cropping sequences received 10, 60, 120 or 180 kg N ha⁻¹. At both sites, about 60 % of alfalfa N was derived from N_2 fixation. Proportions and amounts of Ndff in corn increased with N levels from 3 to 63 % and from 3 to 89 kg N ha⁻¹ respectively, and varied among hybrids and cropping systems. Higher NUE were obtained with 120 than with 180 kg N ha⁻¹. The N rotation effect of 1992 alfalfa on subsequent corn was most noticeable in 1993, and was associated with lower NUE, % Ndff and Ndff values compared to continuous corn. An increase in fertilizer N rate was associated with a decrease in proportion and amount of Ndfrc. Previous alfalfa was associated with higher fertilizer N use by a second corn crop. Pioneer 3979 used less fertilizer N but allocated more of this fertilizer N to the grain compared to the other hybrids. However, hybrids Ndfrc were similar. Hybrid differences reflected their adaptation to the environment. Application of 60 and 120 kg N ha⁻¹ in the rotation or 120 kg N ha⁻¹ in corn monoculture resulted in greater NUE. Higher N rates prevent corn to benefit from N introduced into the system by a previous alfalfa crop.

Introduction

Alfalfa (*Medicago sativa* L.) have been used in rotation with corn (*Zea mays* L.) because of its potential to reduce inorganic N fertilizer needs for corn production (Senaratne and Hardarson, 1988; Varvel and Peterson, 1990; Liang and Mackenzie, 1994). For instance, the nondormant alfalfa var. Nitro was developed in Minnesota (U.S.A.) to supply forage and N in short-term crop rotations (Sheaffer et al., 1988). This cultivar may store less carbohydrates in the roots in fall and uses this energy for top growth. Alfalfa var. Nitro can be used as a high quality forage and/or fall plowdown green manure (Pfarr, 1988). The amount of fixed N in alfalfa residues which returns to the soil will depend on several factors such as number of harvests and amount of residues left in the soil and amount of N₂ fixed by the legume.

Amount and type of alfalfa residue also affect soil N supply and hence subsequent crops fertilizer N recovery (Varvel and Peterson, 1990). Nitrogen from a previous legume crop, or from fertilizer which is retained in a nonlegume crop residue and returned to the soil, provides a residual N source for subsequent crops (El-Harris et al., 1983), which increases available soil N (McCracken et al., 1989) while diluting fertilizer N.

In several reports, alfalfa have supplied all or a fraction of the N needs of subsequent non legume crops (Varvel and Peterson, 1990). Proportions of N derived from previous alfalfa decreased from 58 to 23 % in the grain when N applied to corn increased from 56 to 168 kg N ha⁻¹ (Hesterman et al., 1987). Conversely, Groya and Sheaffer (1985) reported that the amount of N added to the soil by seeding-year alfalfa had little influence on subsequent non legume crop yields. Hesterman et al. (1986) attributed these contrasting results to soil, climatic and stand age effects.

The amounts of N_2 fixed by legumes which returns into the soil also depend on the magnitude of symbiotic N_2 fixation (Hesterman, 1987). Several factors affect legume N_2 fixation and it is important to have estimates for a given environment. LaRue and Patterson (1981) observed that extrapolation of available data on N_2 fixation from a given experimental site to other environments may be of little practical value. Relatively few estimates are available on amounts of N_2 fixed by alfalfa and transferred to a subsequent corn crop under cool and humid climates. Also, more information is needed on early corn fertilizer N use under various cropping systems in those areas.

Corn nitrogen use efficiency (NUE) is important from environmental and economical perspectives, since fertilizer N that is not recovered can be lost from the soil-plant system and can adversely affect the environment (Bock, 1984). Knowing fertilizer NUE of short-season corn in different cropping systems and environments is important. It may help the optimization of corn N fertilization while minimizing environmental contamination by nitrates. However, NUE is seldom used as determinant factor in fertilizer recommendations.

In Quebec, high N fertilization and the use of early corn hybrids have improved average yields (Liang and Mackenzie, 1994; Filion, 1996). However, relatively few studies were conducted to assess how efficiently fertilizer N was used in various cropping systems under this cool and humid climate. In available studies, corn NUE varied from 9 to 60 % and were affected by N levels, plant tissue, year, time and method of N application (Liang and Mackenzie, 1994; Tran, 1994). These determinations of NUE in corn were done in corn monoculture and not within rotation systems including alfalfa.

The N harvest index (grain N uptake/total shoot N) is often used to explain overall N use efficiency (Dhugga and Waines, 1989; Moll et al., 1982). The isotopic method allows the determination of specific amounts of grain or stover N derived from fertilizer or other sources (Harris and Hesterman, 1990). This can be used to explain the partitioning of fertilizer N or N derived from alfalfa residues or soil conserved N in corn plants.

The objectives of this study were to determine : (i) N_2 fixation in the seeding year of the non dormant alfalfa var. Nitro, (ii) proportions and amounts of N derived from N fertilizer (% N_{dff} and N_{dff}), (iii) proportions and amounts of N derived from alfalfa residues or from conserved soil N (% N_{dfrc} and N_{dfrc}), (iv) nitrogen use efficiency (NUE) of three short-season corn hybrids grown in monoculture or following one-year of non dormant alfalfa and (v) fertilizer N partitioning between grain and stover (NHI_{Ndf}) and the partitioning of N derived from alfalfa residues or soil conserved N between grain and stover (NHI_{Ndfrc}).

MATERIALS AND METHODS

Field experiments were conducted from 1992 through 1994 in the province of Quebec (Canada) on two sites with different soil characteristics, a Rivière-du-Loup sandy loam (Humo-ferric Podzol) at Saint-Anselme and a Kamouraska clay (Humic Gleysol) at Saint-Nicolas. Soil properties, plot size, plant densities, herbicides and other cultural practices involved were described in detail in Chapter II.

In 1992, half of the experimental plots were seeded with alfalfa (var. Nitro) and the other half with three corn hybrids : Northrup King 0565, Pioneer 3979 and Pioneer 3962. Their corn heat unit (CHU) requirements are respectively 2300, 2325 and 2500. Corn plots received 10, 60, 120 or 180 kg N ha⁻¹. Bromegrass (*Bromus inermis* L. var. Saratoga) was used in 1992 as non-fixing reference crop for alfalfa. There was one bromegrass plot per block (replication) and these plots were subsequently fallowed. Alfalfa and bromegrass plots received 10 kg N ha⁻¹.

Cultural practices for alfalfa establishment were described in Chapter II. The same cultural practices were used for bromegrass, except for the seeding rates which were 14.6 and 18.7 kg ha⁻¹ for alfalfa and bromegrass, respectively. Bromegrass was sown and harvested the same days as alfalfa.

In 1992, micro-plots measuring 1.00 m x 0.76 m were delimited within each alfalfa and bromegrass plots after seedling emergence. They were used for the study of N_2 fixation. Micro-plots received 10 kg N ha⁻¹ as ¹⁵N-enriched NH_4NO_3 (¹⁵NH₄¹⁵NO₃) at 20 % ¹⁵N atom excess (a.e.). Half (5 kg N ha⁻¹) was applied after planting and the other half after the first cut. Alfalfa and bromegrass plants outside the micro-plots received unlabelled NH_4NO_3 and were used for yield determinations. The three central rows over a 40 cm central length portion of alfalfa and bromegrass micro-plots were used for N_2 fixation studies. Isotope dilution of ¹⁵N was used for the determination of the proportions and amounts of N_2 fixed from the atmosphere by alfalfa (Hardarson and Danso, 1993).

In 1993 and 1994, corn was seeded in all plots. On each site, the experiment consisted of four N rates (10, 60, 120 and 180 kg N ha⁻¹), three corn hybrids and two first-year crops. The experimental design was a split-split-plot with four replications at both sites. The N rates were the main plots factor, hybrids the sub-plot factors and first-year (1992) crop (corn or alfalfa) the sub-sub-plot factor.

Micro-plots of 2.6 m x 2.25 m were delimited in each corn plot. Corn micro-plots received ¹⁵N-depleted NH_4NO_3 (¹⁴NH₄¹⁴NO₃) fertilizer at 99.9726 % ¹⁴N abundance. Central portions of inner rows of corn micro-plots were used for ¹⁵N-dilution studies. The dilution of ¹⁵N-depleted tracer with N of natural isotopic composition would cause an increase in ¹⁵N concentration to a level approaching that of natural abundance (Van Kessel and Roskoski, 1988). This dilution was used for the determination of the amounts and proportions of N derived from fertilizer.

Corn micro-plots changed position each year and this allowed measurement of NUE of corn one or two years after alfalfa and N fertilization. The N rates in corn micro-plots were also 10, 60, 120 or 180 kg N ha⁻¹. Corn plants outside the micro-plots received unlabelled NH_4NO_3 and were used for yield determinations. The N fertilizers (either depleted in micro-plots or unlabelled in other plot parts) were applied in two banded

fractions : one fraction (10 or 25 kg N ha⁻¹) at planting and the other fraction (0, 35, 95 or 155 kg N ha⁻¹) at the six- to eight-leaf stage (tassel initiation). N fertilizers were applied in solution in micro-plots. Each year, P and K were applied in all plots according to soil tests and local recommendations (CPVQ, 1989).

Harvest procedures are described in detail in Chapter II. Plant tissues (grain and stover) from a 1.10 m central portion of the central corn row of micro-plots were dried at 65°C. They were first ground with a Wiley Mill to pass through a 2 mm screen and then through a 0.08 mm screen using a Retsch ultracentrifugal mill Type ZM-1 (Brinkmann Instruments Ltd., Mississauga, Ontario, Canada). Ground samples were used for total N analyses (including nitrates) and N isotopic composition determination.

Total N in corn grain and stover was determined by colorimetry using the nitroprusside method (McKeague, 1978). A pre-digestion with salicylic acid to include nitrates was followed by the standard Kjeldahl procedure (Goyal and Hafez, 1990). The % ¹⁵N abundance in plant tissues was determined by mass spectrometry at the Stable Isotope Laboratory, Department of Soil Science, University of Saskatchewan, Saskatoon, Saskatchewan, Canada.

Yield and N uptake data were reported in Chapters II and III. The percentages and amounts of N derived from N₂ fixation (% Ndfa) were calculated as follows (Hardarson and Danso, 1993) :

$$\% \text{ Ndfa} = [1 - (\% \text{ }^{15}\text{N a.e. alfalfa} / \% \text{ }^{15}\text{N a.e. bromegrass})] \times 100$$

$$\text{Total N}_2 \text{ fixed (kg N ha}^{-1}\text{)} = (\% \text{ of fixed N} \times \text{N uptake (kg ha}^{-1}\text{)}) / 100$$

The % ¹⁵N a.e. of bromegrass (reference crop) was 0.6465 for the first harvest and 0.9217 for the second harvest on the sandy loam soil. On the clay soil, these values were respectively 0,6162 and 0.8938.

The percentages and amounts of N derived from fertilizer (% Ndff and Ndff) were calculated as follows (Van Kessel and Roskoski, 1988) :

$$\% \text{ Ndff} = (\% \text{ }^{14}\text{N a.e. corn} / \% \text{ }^{14}\text{N a.e. fertilizer}) \times 100$$

where the fertilizer applied was ^{15}N -depleted NH_4NO_3 ($^{14}\text{NH}_4^{14}\text{NO}_3$)

$$\text{Ndff} = (\% \text{ Ndff} \times \text{total N uptake}) / 100.$$

The % ^{14}N a.e. values of corn in experimental plots was obtained by subtracting the % ^{14}N abundance of unfertilized corn plants of the same hybrid from the % ^{14}N abundance of samples. The % ^{14}N a.e. are reported in Table 4.5.

The percentages and amounts of corn N derived from alfalfa residues or from N conserved in the soil (% Ndfrc and Ndfrc) were obtained as follows :

$$\% \text{ Ndfrc} = [1 - (\% \text{ }^{14}\text{N a.e. rotation} / \% \text{ }^{14}\text{N a.e. monoculture})] \times 100$$

$$\text{Ndfrc (kg ha}^{-1}\text{)} = (\% \text{ Ndfrc} \times \text{total N uptake}) / 100.$$

The fertilizer N use efficiency (NUE) was obtained as follows :

$$\text{NUE} = \text{Ndff (kg ha}^{-1}\text{)} \times 100 / \text{N rate}.$$

The nitrogen harvest index (NHI_{Ndff}) indicating the proportion of total Ndff in the grain fraction was obtained from the following relation :

$$\text{NHI}_{\text{Ndff}} = (\text{Ndff}_{\text{grain}} \times 100) / (\text{Ndff}_{\text{grain}} + \text{Ndff}_{\text{stover}}).$$

The nitrogen harvest index ($\text{NHI}_{\text{Ndfrc}}$) indicating the proportion of total Ndfrc in the grain fraction was obtained from the following relation :

$$\text{NHI}_{\text{Ndfrc}} = (\text{Ndfrc}_{\text{grain}} \times 100) / (\text{Ndfrc}_{\text{grain}} + \text{Ndfrc}_{\text{stover}}).$$

The SAS (Statistical Analysis System Institute, Inc., 1990) procedures were used for statistical analyses. For each variable, experimental error variances were tested for homogeneity using Bartlett's test (Steel and Torrie, 1980). In 1992, an analysis of

variance was conducted to check for differences among alfalfa plots for amounts of N_2 fixed and forage yields. This allowed inferences on amounts of N included by alfalfa among plots. Each first-year alfalfa plot consisted of a subsequent corn hybrid x N rate combination. Orthogonal coefficients for unequal intervals were calculated and orthogonal contrasts were realised in 1993 and 1994 to determine linear and quadratic trends for corn fertilizer N recovery when grown continuously or after one year alfalfa. Due to heterogeneity of error variances between sites, data are presented by site.

RESULTS

Proportions and amounts of N_2 fixed by Nitro alfalfa

At both sites, N concentration (%), and proportions and amounts of N derived from atmosphere (% Ndfa and Ndfa) of alfalfa var. Nitro were similar among plots (Tables 4.1 and 4.2). Also, forage yield and N uptake of alfalfa were similar among plots on both the sandy loam and the clay soils (Plot, Tables 4.1 and 4.2; Tables 4.3 and 4.4).

Forage yields, and percentages and amounts of Ndfa of alfalfa var. Nitro were larger in the first compared to the second harvest at both sites (H, Tables 4.1 to 4.4). Alfalfa N concentration was larger in the second compared to the first harvest (Tables 4.1 to 4.4).

Percentages of corn N derived from fertilizer

Year 1993

On the sandy loam, the grain and stover % Ndff increased with increasing N rate and the increase was larger at the higher N rates under continuous corn compared to the rotation (N x FYC, Tables 4.6 and Table 4.10). There were no hybrid differences and on average, the grain % Ndff increased from 4.6 to 56.4 % in monoculture and from 3.1 to 46.5 % in rotation, when the N rate increased from 10 to 180 kg N ha⁻¹. Similar observations were made for stover % Ndff (Tables 4.7 and 4.11).

On the clay soil, the grain and stover % Ndff increased with N rate but tended to level off at high N rates (N_0 , Tables 4.7, 4.10 and 4.11). The increase in grain and stover % Ndff was larger above 120 kg N ha⁻¹ under continuous corn compared to the rotation (N x FYC, Tables 4.7 and 4.10). Grain % Ndff increased from 4.5 to 56.2 % under continuous corn and from 2.9 to 48.9 % in the rotation, when N rates increased from 10 to 180 kg N ha⁻¹.

Differences were also observed among hybrids for percent Ndff in the stover on the clay soil. The two Pioneer hybrids (P3979 and P3962) did not differ in stover percent Ndff but hybrid NK0565 derived a larger percentage of stover N from fertilizer compared to P3979 (H, Tables 4.7 and 4.10).

Year 1994

At both sites, the influence of rotation on percent Ndff of grain and stover was no longer significant and there were no hybrid differences. The N rates significantly affected the percent Ndff of grain and stover (Tables 4.8, 4.9 and 4.10). The percent Ndff increased with N rates but tended to level off at high N rates (N_0 , Tables 4.8, 4.9 and 4.10). On the sandy loam soil and on average for the three hybrids and two crop successions, the grain % Ndff varied from 3.5 to 53.2 % when the N rate increased from 10 to 180 kg N ha⁻¹. In the stover, the increase in percent Ndff was 4.5 to 58.6 % (Table 4.10).

On the clay soil and on average for the three hybrids, the grain Ndff increased from 3.4 to 53.2 % when the N rates increased from 10 to 180 kg N ha⁻¹. In the stover, the corresponding increase in % Ndff was 5.9 to 61.9 % (Table 4.10)

Amounts of corn N derived from fertilizer

Year 1993

At both sites, grain Ndff increased with N rates and the increase was larger at higher

N rates under continuous corn compared to the rotation (N x FYC, Tables 4.6 and 4.11). The grain Ndff were similar among hybrids. On the sandy loam and averaging for the three hybrids, the amount of grain Ndff varied from 1.7 to 49.8 kg N ha⁻¹ in monoculture and from 2.0 to 43.2 kg N ha⁻¹ in the rotation, when the N rates increased from 10 to 180 kg N ha⁻¹. On the clay soil, the amount of grain Ndff varied from 1.7 to 41.3 kg N ha⁻¹ in monoculture and from 1.6 to 35.8 kg N ha⁻¹ in the rotation when the N rate increased from 10 to 180 kg N ha⁻¹.

On the sandy loam soil, the stover Ndff response to fertilizer N was hybrid dependent (N x H, Tables 4.6 and 4.11). The Ndff increased with N rates but this increase was larger for hybrids NK0565 and P3962 than for hybrid P3979. Also, the stover Ndff response to N was affected by cropping sequences on the sandy loam (N x FYC, Tables 4.6 and 4.11). It was larger in monoculture than in rotation, particularly when more than 120 kg N ha⁻¹ was applied.

On the clay soil, there was a significant N x H x FYC interaction for stover Ndff. Stover Ndff increased with N rates but was smaller in the rotation than in monoculture at all N rates except for 10 kg N ha⁻¹ for NK0565 and 60 kg N ha⁻¹ for P3962 (Tables 4.7 and 4.11).

Year 1994

On the sandy loam soil, the impact of the rotation on Ndff was no longer significant. The grain Ndff was mainly affected by N fertilizer application and hybrid differences (N x H, Tables 4.8 and 4.11). The grain Ndff increased with N rates, and more for hybrid P3979 than for hybrid P3962. The stover Ndff was mainly affected by N fertilizer application or hybrid differences. There was a quadratic response of stover Ndff to fertilizer N (N_Q, Tables 4.8 and 4.11). Stover Ndff was larger for hybrid P3962 compared to hybrid P3979.

On the clay soil, the grain Ndff increased with N rates and tended to level off at high N rates. There was a differential hybrid grain Ndff response to the rotation (H x FYC, Tables 4.9 and 4.11). The grain Ndff were larger in the rotation for hybrids NK0565 and P3979. In the contrary, the grain Ndff were larger under continuous corn for hybrid P3962 than for P3979. The stover Ndff increased with N rates and tended to level off at high N rates (N_0 , Tables 4.9 and 4.11). Hybrids NK0565 and P3979 had similar Ndff but Ndff of hybrid P3962 was larger.

Nitrogen use efficiency

Year 1993

On the sandy loam soil, the cropping sequence influenced grain and stover NUE response to N fertilizer (FYC and N x FYC, Tables 4.6 and 4.12). The grain NUE increased with N rates (N_L , Tables 4.6 and 4.12) but was generally lower in the rotation compared to continuous corn with larger differences at higher N rates. The stover NUE increased with N rates but, in contrast to the grain, decreased at higher N rates (N_0 , Tables 4.6 and 4.12). Stover NUE was also lower in the rotation compared to continuous corn with greater differences occurring at higher N rates. Hybrid differences were observed for stover NUE (H, Tables 4.6 and 4.12). Hybrids NK0565 and P3979 had similar stover NUE but that of P3962 was larger compared to P3979.

On the clay soil, the cropping sequence also affected grain and stover NUE response to N fertilizer (N x FYC, Tables 4.6 and 4.12). The grain and stover NUE increased with N rates but, in contrast to the sandy loam soil, both grain and stover NUE decreased when the N rate increased from 120 to 180 kg ha⁻¹ (N_0 , Table 4.7). Grain and stover NUE were lower in the rotation compared to continuous corn and differences were larger at higher N rates (N x FYC, Tables 4.6 and 4.12).

Year 1994

At both sites, hybrids NK0565 and P3979 had similar stover NUE. The stover NUE of P3962 was larger compared to that of P3979 (Tables 4.8 , 4.9 and 4.12). At both sites also, the grain and stover NUE increased with N rates from 0 to 120 kg ha⁻¹ and then decreased at 180 kg ha⁻¹ (N₀, Tables 4.8, 4.9 and 4.12).

On the sandy loam soil, there was a differential cropping sequence effect on corn hybrids for grain NUE (H x FYC, Tables 4.8 and 4.12). The grain NUE was larger in the rotation compared to continuous corn for hybrid P3962 but not for hybrids NK0565 and P3979. The stover NUE was also larger in the rotation than in continuous corn on the sandy loam soil (FYC, Tables 4.8 and 4.12).

For all hybrids, grain NUE was larger in the rotation compared to continuous corn on the clay soil (FYC, Tables 4.9 and 4.12). Hybrid differences occurred for stover NUE (H, Tables 4.9 and 4.12). Hybrid P3979 had larger NUE than P3962.

N derived from alfalfa residues or from conserved soil N (Ndfrc)

Differences in percentages and amounts of Ndfrc were mainly observed in 1993 and only data from that year will be presented. The percentages and amounts of Ndfrc were mainly affected by N fertilization. In 1994 at both sites, no differences due to N level, hybrids or their interaction were observed for percentages and amounts of N derived from alfalfa residues or from conserved soil N (Ndfrc).

On the sandy loam soil and on average amounts of corn Ndfrc were 20.2 kg N ha⁻¹ in the grain and 18.4 kg N ha⁻¹ in the stover. The percentage of Ndfrc in the grain and stover decreased as fertilizer N rates increased (N_L, Tables 4.13 and 4.14). The grain and stover Ndfrc were not affected hybrid differences.

On the clay soil, both percentages and amounts of grain Ndfrc decreased with increasing N rate. The decrease was steeper when N rates increased from 10 to 60 kg N ha⁻¹ (N₀, Tables 4.13 and 4.14). Both percentages and amounts of Ndfrc in the stover decreased with increasing N rates (N_L, Tables 4.13 and 4.14).

There was a differential hybrid response to N fertilizer for stover Ndfrc on the clay soil (N x H, Tables 4.13 and 4.14). This interaction was due to a quadratic stover Ndfrc response of hybrid NK0565 compared with linear decrease for hybrids P3979 and P3962 to applied fertilizer N (N_L and N₀, Tables 4.13 and 4.14).

Nitrogen harvest index for Ndff (NHI_{Ndff})

Year 1993

On the sandy loam soil, hybrids differed in the partition of N derived from fertilizer (Ndff) between grain and stover (Tables 4.15 and 4.16). The NHI_{Ndff} was larger for hybrid P3979 compared to hybrids NK0565 and P3962.

On the clay soil, there was a differential hybrid NHI_{Ndff} response to fertilizer N. The NHI_{Ndff} increased with N rate but the magnitude of the increase was larger for hybrid NK0565 compared to hybrids P3979 and P3962.

Year 1994

On the sandy loam soil, there was a differential hybrid NHI_{Ndff} response to fertilizer N (Tables 4.15 and 4.16). The NHI_{Ndff} increased with N rate for hybrid NK0565 and P3979 but decreased with N rate for hybrid P3962.

On the clay soil, differences were observed among hybrids for NHI_{Ndff} (Tables 4.15 and 4.16). The NHI_{Ndff} of hybrid P3979 was larger compared to that of hybrid P3962.

Nitrogen harvest index for Ndfrc (NHI_{Ndfrc})

On the sandy loam soil, there was no difference among N rates, hybrids or cropping system in the partitioning of N derived from alfalfa residues or conserved soil N (NHI_{Ndfrc}) between grain and stover in 1993 and 1994 (Tables 4.17 and 4.18).

On the clay soil, there was a significant fertilizer N effect on NHI_{Ndfrc} in 1993 (Tables 4.17 and 4.18). The NHI_{Ndfrc} decreased between 10 and 60 kg N ha⁻¹, from 57 to 33 and then increased to 42 and 48 when N rates were 120 and 180 kg N ha⁻¹, respectively. In 1993 the NHI_{Ndfrc} was similar for all N rates, hybrids and crop successions.

DISCUSSION

In Quebec, average seeding-year dry matter yield of alfalfa cultivars is 3.4 Mg ha⁻¹ (CPVQ, 1984). Alfalfa var. Nitro yields were above this average on the sandy loam soil (3.7 Mg ha⁻¹) but lower yields were observed on the clay soil (2.7 Mg ha⁻¹). High soil moisture and delayed sowing were not conducive to a high productivity of alfalfa stands on the clay soil.

Our results indicate a total forage N uptake of 126 kg N ha⁻¹ on the sandy loam soil and 92 kg N ha⁻¹ on the clay soil. In Quebec, average forage N uptake of alfalfa cultivars is 92 kg N ha⁻¹ (CPVQ, 1989), which is equivalent to the amount obtained on the clay soil with moderate alfalfa Nitro stands. In the northern US Corn Belt states, Alfalfa var. Nitro was reported as the highest yielding (dry matter and N) alfalfa cultivar for a single-year of production (Pfarr, 1988). Harvested twice in the summer during the seeding year in Minnesota, forage dry matter yields of alfalfa var. Nitro averaged 4.5 Mg ha⁻¹ (Sheaffer et al., 1988).

The amount of N in alfalfa var. Nitro forage resulting from biological N₂ fixation was 71 kg N ha⁻¹ yr⁻¹ on the sandy loam soil and 57 kg N ha⁻¹ yr⁻¹ on the clay soil. Root yields were not estimated in our experiment. Data from Sheaffer et al. (1988) suggest that at a fall harvest, there was about 1.56 fold N in roots in the top 30 cm soil layer compared to harvested forage. Based on this relationship, in our experiment we would expect 94 kg N ha⁻¹ on the sandy loam soil and 68 kg N ha⁻¹ on the clay soil in the upper 30 cm soil layer from alfalfa roots plowdown.

Forage N yields and amounts of N returned to the soil by roots and crowns is greatly affected by cutting schedules. Sheaffer et al. (1988) obtained the highest forage dry matter and N yields with three summer harvests and herbage regrowth harvest at bud in fall. However, larger root N yields were obtained with a single fall harvest. Well established alfalfa stands produced more dry matter and N yields with a single harvest schedule (Sheaffer et al., 1991). The harvesting schedule of alfalfa may be adjusted if the goal is forage production or the build-up of residual N. Two harvests may be a good compromise between forage yields and amounts of N returned to the soil in Minnesota and this has to be proven under Quebec conditions.

The proportions and amounts of corn hybrids N derived from fertilizer (N_{dff}) at both sites were significantly smaller in 1993 in the rotation. Growing alfalfa the preceeding year increased readily available soil N either by N spared by the legume or by N from N₂ fixation and subsequent mineralization of alfalfa residues. Compared to corn, alfalfa residues contribute to a more active mineralizable soil N pool (Harris and Hesterman, 1990).

The percentages of corn N_{dff} in 1993 were highest at 180 kg N ha⁻¹. At this rate, up to 48 % of grain N was derived from fertilizer N in the rotation and 57 % after corn; similarly, up to 45 % of stover N was derived from fertilizer after alfalfa and 56 % after corn. In contrast, Varvel and Peterson (1990) found significantly higher fertilizer N

recovery for corn in rotation compared to monoculture. In the same study however, fertilizer N recovery estimated by the difference method was much greater in continuous corn. Our conclusions are based on estimates of fertilizer N recovery by corn after seeding-year alfalfa. Lower proportions of fertilizer N may be recovered by corn following an older alfalfa stand but conditions are not always favorable for long term maintenance of alfalfa stands in Quebec.

The decrease in the proportions of fertilizer N in both corn grain and stover which results from N input by the alfalfa crop and conserved soil N was noticeable in 1993 but not in 1994. This suggests that two years after a single year alfalfa crop, little alfalfa N remained in the soil and that the N conserving effect of previous alfalfa was exhausted.

The differences in grain Ndff and NUE were larger between Pioneer hybrids. Hybrid P3979 was more adapted and had higher Ndff and NUE compared to P3962. Similar observations about corn hybrids and their NUE were made by Sanchez and Blackmer (1988) and Liang and MacKenzie (1994). Although P3979 (a well adapted hybrid in terms of CHU requirements) had less fertilizer N in the stover compared to the other hybrids, this was not compensated by larger stover Ndfrc.

Our results indicate that fertilizer NUE varied from 20 to 60 % and were influenced by N level, hybrids and cropping systems. These results compare well with those obtained by others. In Quebec, Liang and Mackenzie (1994) found that corn fertilizer N recovery varied with N rate and year from 9 to 58 %. Up to 60 % fertilizer NUE was also found by Tran (1994) in which corn NUE was affected by N level, time and method of N application. However, these observations were made with continuous corn only.

At 60, 120 and 180 kg N ha⁻¹ in 1993, continuous corn utilized fertilizer N more efficiently than corn in rotation and amounts of Ndfrc decreased at high N rates. This confirms observations reported in Chapter III which suggested that heavy N fertilization after

alfalfa prevents corn from benefits derived from N introduced into the system by the alfalfa crop. In 1993, amounts of grain N_{dfrc} decreased from 24.8 to 15.6 kg N ha⁻¹ on the sandy loam and from 18.3 to 9.5 kg N ha⁻¹ on the clay soil when fertilizer N rates increased from 10 to 180 kg N ha⁻¹. Thus, using high fertilizer N rates after alfalfa could lead to important N losses in the environment. Our results are partially in contrast with those obtained by Varvel and Peterson (1990) who observed fertilizer N recovery of corn grown in rotation with legumes significantly higher compared to continuous corn when 90 and 180 kg N ha⁻¹ were applied.

Larger amounts of corn N were derived from fertilizer when 180 kg N ha⁻¹ were applied but the higher NUE were obtained with 120 kg N ha⁻¹ at both sites. Thus, although hybrids obtained larger amounts of N from fertilizer with increasing N rates, NUE results indicate that above 120 kg N ha⁻¹, hybrids would use fertilizer N less efficiently in corn monoculture or following alfalfa. These results along with those reported in previous chapters suggest substantial fertilizer N losses in plots receiving 180 kg N ha⁻¹ in both crop successions.

The $NHI_{N_{dff}}$ increased with N rate, but were mainly affected by hybrid differences. The $NHI_{N_{dff}}$ explained differences in hybrids NUE. The most adapted hybrids (NK0565 and P3979) had larger $NHI_{N_{dff}}$. Hybrid adaptation may allow for greater fertilizer N translocation and/or remobilization into the grain.

The contribution of N_{dfrc} to total grain N uptake was different on the sandy loam soil compared to the clay soil. Observations on the sandy loam soil suggest that in corn monoculture or in the rotation with alfalfa, at all N rates for the three hybrids the same proportions of N_{dfrc} were found in the grain and stover. High fertilizer N rates prevented corn grain to benefit from N_{dfrc} . Hesterman et al. (1987) observed a decrease in corn grain and stover percentages of N derived from alfalfa residues as N rate increased. They reported that percentages of N derived from alfalfa residues decreased from 57

to 23 % in the grain when the N rate applied to corn increased from 56 to 168 kg N ha⁻¹. We observed a greater contribution of Ndfrc to grain N at the lower N rate (10 kg N ha⁻¹) after alfalfa. This agrees with previous observations (in Chapters II and III) which indicated that N rates above 120 kg ha⁻¹ are not advisable for short-season corn after alfalfa.

Conclusions

Nondormant alfalfa var. Nitro has a good potential for both N₂ fixation and as a forage crop in Quebec. The cultivar Nitro may be of interest as N source for corn in short rotations in Quebec where alfalfa is an important forage crop and where cold winters would cause important losses in its stands. However, specific trials have to be conducted in order to compare its performance to those of existing moderately dormant and dormant cultivars.

The inclusion of alfalfa var. Nitro as first crop in the rotation with corn resulted in lower corn grain and stover NUE, % Ndff and Ndff values compared to continuous corn. A concomitant increase in percentages and amounts of Ndfrc was often observed. This impact of the rotation was mainly noticeable the year following alfalfa and almost non-existent two years after. This result confirms that two years after its cultivation, no N credit from a single-year alfalfa crop should be provided for a subsequent corn crop.

The NUE of fertilizer N should be considered in the formulation of N recommendations for corn under short growing seasons where environmental factors limiting corn production are important. Including NUE, our results suggest that in areas accumulating 2300 to 2500 CHU in Quebec, adapted hybrids could be grown satisfactorily with 120 kg N ha⁻¹.

Hybrid P3979 used less fertilizer N compared to the other hybrids; however, this hybrid partitioned the absorbed fertilizer N in favor of grains. Using less N from fertilizer was not compensated by increased use of N from alfalfa residues or soil N conserved by the alfalfa crop. Differences observed between hybrids NK0565 (2300 CHU) and P3979 (2325 CHU) and between P3979 and hybrid P3962 for %N_{dff}, N_{dff}, NUE and NHI_{N_{dff}} indicate that under short growing seasons, response to N is affected by both genetic differences among hybrids and their adaptation to the environment.

Table 4.1. Summary from the analyses of variance for forage yield, N concentration (%) and uptake, and proportions and amounts of N₂ fixed by Nitro alfalfa on the sandy loam soil (at Saint-Anselme) in 1992.

Sources of variation	df	forage yield (x 10 ⁴)	N concentration	N uptake	% Ndfa ^z	Ndfa ^y
Replications	3	1.68	0.301	98.2	3 966 ***	1 375 ***
Plot ^w	11	2.27	0.193	60.9	112	104
Error (a)	33	1.98	0.132	59.39	52	60
Harvests (H)	1	837.26 ***	18.23 ***	487 **	1 231 **	1 382 ***
Plot x H	11	1.77	0.228	119 *	34.32	52.51
Error (b)	36	1.80	0.12	48.34	152	58.08

^z : Percent nitrogen derived from atmosphere

^y : Amounts of alfalfa Nitro nitrogen derived from atmosphere

^w : First-year alfalfa plot - Each FYA plot consists of a subsequent corn hybrid x N rate combination

*, **, *** : Significant at the 0.05, 0.01 and 0.001 probability levels, respectively.

Table 4.2. Summary from the analyses of variance for forage yield, N concentration (%) and uptake, and proportions and amounts of N₂ fixed by Nitro alfalfa on the clay soil (at Saint-Nicolas) in 1992.

Sources of variation	df	forage yield (x 10 ⁴)	N concentration	N uptake	% Ndfa ^z	Ndfa ^y
Replications	3	30.47 ***	1.697 ***	1 322 ***	1 267 ***	1 525 ***
Plot ^w	11	10.07	0.061	134	180	107
Error (a)	33	4.82	0.109	70	114	59
Harvests (H)	1	540.06 ***	13.65 ***	797 ***	8 823 ***	4 057 ***
Plot x H	11	3.63	0.077	64.5	47.63	54
Error (b)	36	21.15	0.09	35.35	185	78.1

^z : Percent nitrogen derived from atmosphere

^y : Amounts of alfalfa Nitro nitrogen derived from atmosphere

^w : First-year alfalfa plot - Each FYA plot consists of a subsequent corn hybrid x N rate combination

*, **, *** : Significant at the 0.05, 0.01 and 0.001 probability levels, respectively.

Table 4.3. Forage yield, N concentration (%) and uptake, and proportions and amounts of N₂ fixed by Nitro alfalfa on the sandy loam at Saint-Anselme in 1992.

Harvest	forage yield (kg ha ⁻¹)	N concentration (%)	N uptake (kg ha ⁻¹)	% ¹⁵ N a.e. ^x	% Ndfa ^z	Ndfa ^y (kg ha ⁻¹)
1st harvest	2 142	3.05	65.3	0.2802	63.9	41.8
2nd harvest	1 552	3.92	60.8	0.2499	56.8	34.3

^z : Percent nitrogen derived from atmosphere

^y : Amounts of alfalfa Nitro nitrogen derived from atmosphere

^x : a.e., atom excess

The ¹⁵N a.e. of bromegrass (reference crop) was 0.6465 for the first harvest and 0.9217 for the second harvest.

Table 4.4. Forage yield, N concentration (%) and uptake, and proportions and amounts of N₂ fixed by Nitro alfalfa on the clay soil at Saint-Nicolas in 1992.

Harvest	forage yield (kg ha ⁻¹)	N concentration (%)	N uptake (kg ha ⁻¹)	% ¹⁵ N a.e. ^x	% Ndfa	Ndfa (kg ha ⁻¹)
1st harvest	1 629	3.00	48.9	0.5554	68.5	34.6
2nd harvest	1 155	3.76	43.4	0.5275	49.3	21.6

^z : Percent nitrogen derived from atmosphere

^y : Amounts of alfalfa Nitro nitrogen derived from atmosphere

^x : a.e., atom excess

The ¹⁵N a.e. of bromegrass (reference crop) was 0.6162 for the first harvest and 0.8938 for the second harvest.

Table 4.5. Percent ¹⁵N atom excess in three corn hybrids grain and stover on the sandy loam soil (at Saint-Anselme) and on the clay soil (at Saint-Nicolas) in 1993 and 1994.

N levels (kg ha ⁻¹)	SANDY LOAM SOIL						CLAY SOIL					
	Northrup King 0565		Pioneer 3979		Pioneer 3962		Northrup King 0565		Pioneer 3979		Pioneer 3962	
	FYC ¹	FYA ²	FYC	FYA	FYC	FYA	FYC	FYA	FYC	FYA	FYC	FYA
	----- % -----											
	<i>grain, 1993</i>											
10	0.0151	0.0102	0.0152	0.0106	0.0152	0.0095	0.0128	0.0096	0.0160	0.0985	0.0160	0.0102
60	0.0893	0.0559	0.0868	0.0620	0.0826	0.0589	0.0831	0.0708	0.0780	0.0670	0.0741	0.0708
120	0.1568	0.1200	0.1546	0.1112	0.1484	0.1165	0.1550	0.1270	0.1377	0.1214	0.1452	0.1189
180	0.1907	0.1584	0.1886	0.1495	0.1798	0.1528	0.1908	0.1681	0.1875	0.1577	0.1795	0.1598
	<i>stover, 1993</i>											
10	0.0204	0.0127	0.0238	0.0135	0.0227	0.0123	0.0234	0.0158	0.0234	0.0130	0.0237	0.0120
60	0.1174	0.0732	0.1118	0.0711	0.1046	0.0621	0.1146	0.0847	0.1018	0.0760	0.1066	0.0753
120	0.1670	0.1152	0.1680	0.1088	0.1655	0.1066	0.1663	0.1162	0.1572	0.1282	0.1635	0.1193
180	0.1872	0.1434	0.1794	0.1325	0.1729	0.1420	0.1993	0.1709	0.1864	0.1478	0.1856	0.1563
	<i>grain, 1994</i>											
10	0.0128	0.0121	0.0124	0.0122	0.0121	0.0125	0.0108	0.0112	0.0113	0.0126	0.0127	0.0136
60	0.0863	0.0832	0.0943	0.0778	0.0848	0.0849	0.0841	0.0826	0.0781	0.0811	0.0803	0.0799
120	0.1728	0.1636	0.1632	0.1647	0.1609	0.1645	0.1479	0.1463	0.1448	0.1404	0.1484	0.1409
180	0.1884	0.1901	0.1882	0.1839	0.1924	0.1889	0.1858	0.1941	0.1907	0.1875	0.1956	0.1806
	<i>stover, 1994</i>											
10	0.0170	0.0166	0.0159	0.0164	0.0136	0.0161	0.0202	0.0207	0.0204	0.0235	0.0209	0.0212
60	0.1049	0.1075	0.1155	0.1020	0.1084	0.1067	0.1368	0.1318	0.1251	0.1208	0.1220	0.1146
120	0.1958	0.1883	0.1822	0.1850	0.1883	0.1953	0.1921	0.1855	0.1896	0.1908	0.1798	0.1825
180	0.2014	0.2103	0.2077	0.2044	0.2106	0.2126	0.2180	0.2231	0.2240	0.2212	0.2190	0.2147

¹ : First-year corn of the same hybrid

² : First-year alfalfa Nitro.

Table 4.6. Summary of the analyses of variance for grain and stover proportions and amounts of N derived from fertilizer (Ndff) and nitrogen use efficiency (NUE) on the sandy loam soil (at Saint-Anselme) in 1993.

Sources of variation	df	Grain			Stover		
		% Ndff	Ndff	NUE	% Ndff	Ndff	NUE
		mean squares					
Rep ^z	3	19.8	45.3	15.2	4.29	132	74.9
Nitrogen (N)	3	10591 ***	9258 ***	324 *	8757 ***	3853 ***	138
N _L ^y	1	31101 ***	27707 ***	739 **	24305 ***	11074 ***	21.0
N _Q ^x	1	649 ***	5.84	223	1946 ***	318 *	350 *
Error (a)	9	18.8	89.4	58.8	22.2	38.9	35.9
Hybrids (H)	2	11.5	37.2	56.8	23.5	136 ***	76.3 **
NK0565 ^v vs P3979 ^w	1	7.04	21.4	34.7	17.6	132 **	47.4
P3979 vs P3962 ^u	1	4.58	74.4 *	113 *	6.8	257 ***	152 **
N x H	6	3.59	4.86	3.64	8.18	38.4 *	19.8
N _L x (NK0565 vs P3979)	1	11.22	0.49	6.29	19.8	116 **	64.0 *
N _L x (P3979 vs P3962)	1	0.11	17.55	9.87	5.15	168 **	52.8
Error (b)	24	13.9	14.3	21.8	12.2	14.4	13.1
First-year crop (FYC)	1	1443 ***	304 **	108 **	3063 ***	244 ***	64.9 *
N x FYC	3	112 ***	86.7 ***	91.4 ***	217 ***	123 ***	116 ***
N _L x FYC	1	226 ***	226 ***	174 ***	292 ***	181 ***	64.9 *
N _Q x FYC	1	110 **	5.82	98.9 *	359 ***	34.8	163 ***
Error (c)	36	9.37	9.74	13.39	8.87	13.47	11.6

^z : Replicates; ^y : linear effect of N; ^x : quadratic effect of N

^w : Pioneer 3979; ^v : Northrup King 0565; ^u : Pioneer 3962

^l : Percent nitrogen derived from fertilizer; ^o : Amounts of nitrogen derived from fertilizer

^r : Nitrogen use efficiency

*, **, *** : Significant at the 0.05, 0.01 and 0.001 probability levels respectively.

Table 4.7. Summary of the analyses of variance for grain and stover % and amounts of N derived from fertilizer (Ndff) and nitrogen use efficiency (NUE) on the clay soil (at Saint-Nicolas) in 1993.

Sources of variation	df	Grain			Stover		
		% Ndff	Ndff	NUE ^z	% Ndff	Ndff	NUE
		----- mean squares -----					
Rep ^z	3	68.6	36.2	99.2	48.1	20.8	28.9
Nitrogen (N)	3	10968 ***	6369 ***	314 **	10113 ***	2885 ***	134 **
N _L ^y	1	32353 ***	18861 ***	229 ·	28865 ***	8469 ***	1.23
N _o ^x	1	547 ***	215 **	681 **	1398 ***	185 ·	318 ***
Error (a)		22.2	20.1	29.7	21.2	21.2	12.9
Hybrids (H)	2	27.6	58.3	20.2	42.1 ·	35.3 **	30.1 ·
P3979 ^v vs NK0565 ^w	1	37.0	79.1	7.77	72.8 ·	61.0 **	47.7 ·
P3979 vs P3962 ^u	1	0.41	0.73	12.6	1.78	43.6 ·	42.3 ·
N x H	6	7.80	18.40	36.3	15.4	21.1 ·	11.6
N _L x (NK0565 vs P3979)	1	17.1	38.9	98.1 ·	24.7	52.1 **	4.67
N _o x (NK0565 vs P3979)	1	12.3	23.1	113.0 ·	11.1	18.8	1.56
Error (b)	24	14.2	29.9	20.4	10.7	5.91	6.21
First-year crop (FYC)	1	520 ***	119 **	52.7 ·	1730 ***	79.2 ***	74.7 ***
N x FYC	3	53.4 ·	57.6 **	30.8 ·	95.2 ***	30.5 ***	17.8 ·
N _L x FYC	1	142 ***	141 ***	43.6 ·	161 ***	43.1 **	1.99
N _o x FYC	1	3.59	4.03	2.38	122 ***	7.69	0.46
H x FYC	2	1.50	3.79	8.98	2.38	14.4 ·	5.38
N x H x FYC	6	5.22	11.90	10.6	9.21	13.2 **	7.55
Error (c)	36	5.83	9.62	7.99	4.88	3.89	5.69

^z : Replicates; ^y : linear effect of N; ^x : quadratic effect of N

^w : Pioneer 3979; ^v : Northrup King 0565; ^u : Pioneer 3962

[·] : Percent nitrogen derived from fertilizer; [·] : Amounts of nitrogen derived from fertilizer

[·] : Nitrogen use efficiency

*, **, *** : Significant at the 0.05, 0.01 and 0.001 probability levels respectively.

Table 4.8. Summary of the analyses of variance for grain and stover % and amounts of N derived from fertilizer (Ndff) and nitrogen use efficiency (NUE) on the sandy loam soil (at Saint-Anselme) in 1994.

Sources of variation	df	Grain			Stover		
		% Ndff	Ndff	NUE	% Ndff	Ndff	NUE
		mean squares					
Rep ^z	3	6.85	60.0	44.8	5.26	21.1	22.6
Nitrogen (N)	3	12315 ***	15669 ***	2023 ***	14712 ***	3882 ***	495 ***
N _L ^y	1	34977 ***	45773 ***	4046 ***	40567 ***	11399 ***	1000 ***
N _o ^x	1	1787 ***	204 *	1680 ***	3485 ***	45.1 **	438 ***
Error (a)	9	19	35.1	48.4	12.1	3.17	8.80
Hybrids (H)	2	1.94	178.0 ***	144.0 **	4.23	87.5 **	54.0 *
NK0565 ^v vs P3979 ^w	1	3.40	8.6	13.3	3.52	17.50	12.8
P3979 vs P3962 ^u	1	0.11	216 **	261 ***	8.19	168 ***	104 **
N x H	6	2.54	50.7 *	26.7	5.75	23.60	14.6
N _L x (NK0565 vs P3979)	1	3.71	62.5	97.4 *	1.27	7.11	2.25
N _L x (P3979 vs P3962)	1	2.60	64.1	0.16	12.7	80.20 *	30.2
N _o x (P3979 vs P3962)	1	4.07	19.2	14.8	1.06	20.9	35.9 *
Error (b)	24	7.83	17.4	15.5	8.34	10.70	7.5
First-year crop (FYC)	1	12.1	13.2	28.3	4E-04	10.50	19.6 *
H x FYC	2	4.0	28.5	27.6 *	5.74	5.62	4.36
Error (c)	36	4.81	11.0	7.75	6.25	6.26	3.92

^z: Replicates; ^y: linear effect of N; ^x: quadratic effect of N;

^v: Northrup King 0565; ^w: Pioneer 3979; ^u: Pioneer 3962;

^t: Percent nitrogen derived from fertilizer;

^r: Amounts of nitrogen derived from fertilizer; ^s: Nitrogen use efficiency;

*, **, ***: Significant at the 0.05, 0.01 and 0.001 probability levels respectively.

Table 4.9. Summary of the analyses of variance for grain and stover % and amounts of N derived from fertilizer (Ndff) and nitrogen use efficiency (NUE) on the clay soil (at Saint-Nicolas) in 1994.

Sources of variation	df	Grain			Stover		
		% Ndff ¹	Ndff ²	NUE ³	% Ndff	Ndff	NUE
		----- mean squares -----					
Rep ⁴	3	89.1	210	194 **	77.3 *	19.0	10.6
Nitrogen (N)	3	11 328 ***	15933 ***	1971 ***	14551 ***	2664 ***	208 **
N _L ⁵	1	33 394 ***	47578 ***	4339 ***	40368 ***	7987 ***	393 ***
N ₀ ⁶	1	589 **	14.8	1570 ***	3150 ***	3.94	210 **
Error (a)	9	33.2	60.5	18.3	16.1	19.3	16.1
Hybrids (H)	2	3.22	1.47	19.8	28.1	114 ***	75.4 ***
P3979 ⁷ vs NK0565 ⁸	1	6.22	1.89	39.3	3.27	19.1	8.72
P3979 vs P3962 ⁹	1	0.71	2.47	7.6	29.1	107 ***	78.2 ***
N x H	6	1.54	29.1	20.1	10.7	26.8 **	9.57
N _L x (NK0565 vs P3979)	1	0.67	18.2	48.2	4.18	21.3	6.63
N _L x (P3979 vs P3962)	1	0.37	7.79	2.35	4.45	58.9 **	11.8
Error (b)	24	8.24	27.5	14.7	10.1	5.18	4.27
First-year crop (FYC)	1	5.14	31.1	59.6 *	4.04	2.4	5.08
H x FYC	2	7.81	28.5 *	15.2	0.36	4.98	2.37
(P3979 vs P3962) x FYC	1	6.83	42.9 *	25.14	0.71	7.32	3.61
Error(c)	36	4.79	8.58	8.77	4.71	3.61	1.88

⁴ : Replicates; ⁵ : linear effect of N; ⁶ : quadratic effect of N;

⁷ : Northrup King 0565 ; ⁸ : Pioneer 3979; ⁹ : Pioneer 3962;

¹ : Percent nitrogen derived from fertilizer;

² : Amounts of nitrogen derived from fertilizer; ³ : Nitrogen use efficiency;

*, **, *** : Significant at the 0.05, 0.01 and 0.001 probability levels respectively.

Table 4.10. Percent of nitrogen derived from fertilizer in three corn hybrids grain and stover on the sandy loam soil (at Saint-Anselme) and on the clay soil (at Saint-Nicolas) in 1993 and 1994.

N levels (kg/ha)	SAINT-ANSELME						SAINT-NICOLAS					
	Northrup King 0565		Pioneer 3979		Pioneer 3962		Northrup King 0565		Pioneer 3979		Pioneer 3962	
	FYC ¹	FYA ²	FYC	FYA	FYC	FYA	FYC	FYA	FYC	FYA	FYC	FYA
	----- % -----											
	<i>grain, 1993</i>											
10	4.57	3.09	4.61	3.21	4.59	2.87	3.88	2.91	4.85	2.99	4.82	3.07
60	27.01	16.90	26.26	18.76	25.01	17.84	25.13	21.43	23.65	20.31	22.37	21.36
120	47.41	36.30	46.78	33.66	44.96	35.29	46.88	38.43	41.75	36.83	43.85	35.88
180	57.68	47.93	57.07	45.23	54.46	46.29	57.73	50.85	56.88	47.82	54.20	48.24
	<i>stover, 1993</i>											
10	6.20	3.85	7.21	4.07	6.89	3.73	7.08	4.80	7.09	3.95	7.21	3.66
60	35.54	22.16	33.85	21.53	31.78	18.87	34.71	25.66	30.86	23.04	32.33	22.84
120	50.54	34.86	50.85	32.94	50.30	32.38	50.36	35.20	47.66	38.88	49.60	36.17
180	56.66	43.42	54.30	40.10	52.53	43.15	60.35	51.74	56.52	44.81	56.29	47.41
	<i>grain, 1994</i>											
10	3.61	3.41	3.49	3.44	3.42	3.52	3.05	3.15	3.19	3.53	3.59	3.84
60	24.38	23.50	26.62	21.98	23.88	23.92	23.70	23.29	21.98	22.83	22.61	22.50
120	48.83	46.23	46.08	46.51	45.34	46.34	41.70	41.25	40.76	39.51	41.78	39.68
180	53.24	53.70	53.15	51.93	54.21	53.23	52.38	54.71	53.66	52.77	55.08	50.86
	<i>stover, 1994</i>											
10	4.77	4.67	4.47	4.61	3.83	4.54	5.69	5.81	5.73	6.61	5.87	5.95
60	29.63	30.38	32.60	28.81	30.54	30.06	38.51	37.09	35.21	34.01	34.41	32.33
120	55.32	53.21	51.34	52.24	53.05	55.02	54.05	52.22	53.36	53.70	50.73	51.48
180	56.89	59.43	58.66	57.73	59.34	59.90	61.36	62.79	63.05	62.26	61.78	60.57

¹ : First-year corn of the same hybrid

² : First-year alfalfa Nitro.

Table 4.11. Amounts of nitrogen derived from fertilizer in three corn hybrids grain and stover on the sandy loam soil (at Saint-Anselme) and on the clay soil (at Saint-Nicolas) in 1993 and 1994.

N levels (kg ha ⁻¹)	SANDY LOAM SOIL						CLAY SOIL					
	Northrup King 0565		Pioneer 3979		Pioneer 3962		Northrup King 0565		Pioneer 3979		Pioneer 3962	
	FYC ¹	FYA ²	FYC	FYA	FYC	FYA	FYC	FYA	FYC	FYA	FYC	FYA
	kg N ha ⁻¹											
	<i>grain, 1993</i>											
10	1.73	1.98	1.86	2.32	1.49	1.80	1.40	1.44	2.17	1.74	1.54	1.68
60	14.14	13.25	16.07	14.44	13.49	13.21	15.21	15.52	14.00	14.26	12.84	14.82
120	34.85	28.79	37.96	30.08	34.19	27.76	35.10	29.66	27.57	26.45	31.85	25.88
180	52.01	42.08	51.74	43.60	45.69	43.21	44.06	38.19	42.68	33.93	37.22	35.27
	<i>stover, 1993</i>											
10	1.28	1.58	1.45	1.72	1.53	1.68	1.56	1.36	1.51	1.28	1.46	1.28
60	11.48	10.63	9.24	11.43	10.98	11.60	12.07	11.98	10.25	10.24	12.16	12.78
120	27.47	22.94	23.75	18.07	36.79	20.29	21.24	18.22	20.79	18.70	26.46	17.58
180	33.08	28.78	26.44	22.20	34.60	28.89	29.06	30.65	26.51	21.22	28.01	24.00
	<i>grain, 1994</i>											
10	1.46	1.47	1.70	1.92	1.37	1.58	1.32	1.39	1.64	1.67	1.26	1.58
60	14.65	14.72	16.97	16.49	12.98	15.15	14.32	16.81	15.66	19.41	17.27	17.69
120	49.32	45.77	43.34	49.90	38.03	41.96	39.03	41.20	40.92	42.82	45.56	41.09
180	62.28	60.43	57.73	56.20	50.33	53.47	60.04	64.20	57.85	61.10	56.95	56.52
	<i>stover, 1994</i>											
10	0.81	0.79	0.69	0.87	0.67	0.85	0.71	0.83	0.78	0.84	0.75	0.86
60	7.02	8.13	7.37	7.50	7.89	9.04	7.77	7.27	6.71	7.52	9.28	9.16
120	22.52	20.65	17.28	20.02	25.53	26.51	13.36	16.09	16.79	17.01	20.17	19.17
180	26.77	28.59	27.91	25.26	29.07	33.26	20.98	21.78	22.98	24.92	30.14	28.77

¹ : First-year corn of the same hybrid

² : First-year alfalfa Nitro.

Table 4.12 : Nitrogen use efficiency (NUE) of three corn hybrids (Northrup King 0565, Pioneer 3979 and Pioneer 3962) grain and stover on the sandy loam soil (at Saint-Anselme) and on the clay soil (at Saint-Nicolas) in 1993 and 1994.

N levels (kg ha ⁻¹)	SANDY LOAM SOIL						CLAY SOIL					
	Northrup King 0565		Pioneer 3979		Pioneer 3962		Northrup King 0565		Pioneer 3979		Pioneer 3962	
	FYC ¹	FYA ²	FYC	FYA	FYC	FYA	FYC	FYA	FYC	FYA	FYC	FYA
----- % -----												
<i>grain, 1993</i>												
10	17.25	19.76	18.63	23.19	14.94	18.01	14.05	14.43	21.68	17.43	15.37	16.82
60	23.56	22.08	26.78	21.47	22.48	22.01	25.35	25.87	23.33	23.77	21.40	24.70
120	29.04	23.99	31.63	25.07	28.49	23.13	29.25	24.72	22.98	22.04	26.54	21.57
180	28.89	23.38	28.75	24.22	25.38	24.00	24.48	21.22	23.71	18.85	20.68	19.59
<i>stover, 1993</i>												
10	12.77	15.76	14.50	17.18	15.35	16.83	15.62	13.60	15.13	12.84	14.59	12.81
60	19.13	17.72	15.40	19.05	18.29	19.33	20.12	19.97	17.08	17.06	20.26	21.29
120	22.89	19.12	19.79	15.06	30.66	16.91	17.70	15.18	17.33	15.59	22.05	14.65
180	18.38	15.99	14.69	12.33	19.22	16.05	16.15	17.03	14.73	11.79	15.56	13.33
<i>grain, 1994</i>												
10	14.61	14.69	16.96	19.24	13.66	15.77	13.21	13.89	16.37	16.73	12.58	15.81
60	24.42	24.54	28.29	27.48	21.63	25.25	23.87	28.02	26.10	32.35	28.78	29.48
120	41.10	38.14	36.12	41.58	31.69	34.97	32.53	34.34	34.10	35.68	37.97	34.24
180	34.60	33.57	32.07	31.22	27.96	29.70	33.36	35.66	32.14	33.94	31.64	31.40
<i>stover, 1994</i>												
10	8.08	7.90	6.87	8.70	6.70	8.51	7.11	8.29	7.85	8.35	7.51	8.64
60	11.70	13.55	12.28	12.50	13.15	15.07	12.96	12.12	11.18	12.54	15.46	15.26
120	18.76	17.21	14.40	16.69	21.28	22.09	11.94	13.41	13.99	14.18	16.80	15.98
180	14.87	15.88	15.50	14.03	16.15	18.48	11.66	12.10	12.77	13.84	16.75	15.98

¹ : First-year corn of the same hybrid

² : First-year alfalfa Nitro.

Table 4.13 : Summary of the analyses of variance for grain and stover % and amounts of N derived from alfalfa residues or from conserved soil N (Ndfrc) on the sandy loam soil (at Saint-Anselme) and on the clay soil (at Saint-Nicolas) in 1993.

Sources of variation	SANDY LOAM SOIL				CLAY SOIL				
	df	Grain		Stover		Grain		Stover	
		%Ndfrc ^u	Ndfrc ^l	%Ndfrc	Ndfrc	% Ndfrc	Ndfrc	% Ndfrc	Ndfrc
		----- mean squares -----							
Rep ^z	3	47.1	53.3	183	102	65.3	17.1	161	66.2 *
Nitrogen (N)	3	615 *	170	838 **	119	1225 ***	272 **	1243 **	52.8 *
N _L ^y	1	1544 *	224	2332 ***	94.2	1666 ***	268 *	3280 ***	127 **
N _Q ^x	1	177	226	153	264	1165 ***	236 *	146	26.6
Error (a)	9	161	69	78	56	43.6	37.6	97.7	10.3
Hybrids (H)	2	15.1	72.6	49.6	39.2	47.6	14.4	70.0	24.7
N x H	6	95.2	40.3	54.9	26.7	124	69.5	127	33.9 *
N _Q x (P3979 ^w vs NK0565 ^v)	1	15.8	3.33	25.2	2.01	328 *	203 *	500 *	114 **
Error (b)	23	152	78.7	62.4	25.8	87.8	40.4	70.0	12.3

^z : Replications; ^y : linear effect of N; ^x : quadratic effect of N

^w : Pioneer 3979; ^v : Pioneer 3962

^u : Percent nitrogen derived from alfalfa residues and from conserved soil N

^l : Amounts of nitrogen derived from alfalfa residues and from conserved soil N in kg ha⁻¹

*, **, *** : Significant at the 0.05, 0.01 and 0.001 probability levels respectively.

Table 4.14 : Percentages and amounts of N derived from alfalfa residues and from conserved soil N for grain and stover of three corn hybrids (Northrup King 0565, Pioneer 3979 and Pioneer 3962) on the sandy loam soil at Saint-Anselme and on the clay soil at Saint-Nicolas in 1993.

N levels (kg ha ⁻¹)	SANDY LOAM SOIL						CLAY SOIL					
	Northrup King 0565		Pioneer 3979		Pioneer 3962		Northrup King 0565		Pioneer 3979		Pioneer 3962	
	% Ndfrc ¹	Ndfrc ²	% Ndfrc	Ndfrc	% Ndfrc	Ndfrc	% Ndfrc	Ndfrc	% Ndfrc	Ndfrc	% Ndfrc	Ndfrc
<i>grain, 1993</i>												
10	30.37	19.36	25.42	18.52	37.04	22.78	24.36	12.41	38.97	22.78	35.24	19.83
60	36.54	26.71	35.29	26.99	27.99	20.80	14.08	10.16	13.63	8.90	4.43	2.94
120	22.87	18.82	27.94	25.15	21.39	16.88	17.34	13.97	11.41	7.90	17.20	12.39
180	16.59	14.00	20.58	19.64	15.12	13.18	11.90	9.35	15.81	11.15	11.19	8.09
<i>stover, 1993</i>												
10	35.92	14.55	42.91	18.06	45.43	21.01	32.57	9.77	43.90	14.33	47.65	16.32
60	37.44	18.03	35.78	19.64	40.22	25.24	26.15	12.59	24.72	10.53	29.21	16.02
120	30.87	20.46	35.05	19.15	35.44	22.02	30.11	15.74	18.74	8.85	26.92	12.78
180	22.84	15.79	26.01	14.17	17.63	12.33	14.27	8.72	20.72	9.79	15.65	8.14

¹ : Percentage of N derived from alfalfa residues and from conserved soil N

² : Amount of N derived from alfalfa residues and from conserved soil N in kg ha⁻¹.

Table 4.15. Summary of the analyses of variance for N derived from fertilizer (NH_{4-N}) on the sandy loam soil (Saint-Anselme) and on the clay soil (Saint-Nicolas) in 1993 and 1994.

Sources of variation	df	Sandy loam soil		clay soil	
		1993	1994	1993	1994
----- mean squares -----					
Rep ^z	3	175	58	85	107
Nitrogen (N)	3	216	3	185	194
Error (a)	9	69	22	73	56
Hybrids (H)	2	421 ***	390 ***	88 ·	185 ***
NK0565 ^y vs P3979 ^x	1	337 **	120 **	89 ·	1
P3979 vs P3962 ^w	1	820 ***	768 **	163 **	285 ***
N x H	6	20	41 ·	65 ·	33
N _L x (NK0565 vs P3979)	1	56	68 ·	77	104 ·
N _O x (NK0565 vs P3979)	1	27	1	225 **	4
N _O x (P3979 vs P3962)	1	91	71 ·	4	1
Error (b)	24	34	12	19	11
First-year crop (FYC)	1	1	15	55	3
Error (c)	36	40	10	19	11

^z : Replications; ^y : Pioneer 3979; ^x : Northrup King 0565; ^w : Pioneer 3962

·, **, *** : Significant at the 0.05, 0.01 and 0.001 probability levels respectively.

Table 4.16. Mean nitrogen harvest index for N derived from fertilizer (NH_{4-N}) on the sandy loam soil (Saint-Anselme) and on the clay soil (Saint-Nicolas) in 1993 and 1994.

N rate (kg ha ⁻¹)	Sandy loam soil			Clay soil		
	NK0565 ^z	P3979 ^y	P3962 ^x	NK0565	P3979	P3962
<i>Year 1993</i>						
10	56	57	50	49	57	54
60	54	59	54	56	58	53
120	55	62	54	62	58	57
180	60	66	58	58	61	58
<i>Year 1994</i>						
10	65	70	66	64	66	63
60	66	70	62	67	71	65
120	69	71	61	73	71	69
180	69	68	62	74	71	66

^z : Northrup King 0566

^y : Pioneer 3979

^x : Pioneer 3962.

Table 4.17. Summary of the analyses of variance for N derived from alfalfa residues or soil conserved N harvest index (NHI_{cons}) on the sandy loam soil (at Saint-Anselme) and on the clay soil (at Saint-Nicolas) in 1993 and 1994.

Sources of variation	Sandy loam soil		clay soil	
	1993	1994	1993	1994
	----- mean squares -----			
Rep ^z	32	39439	438	835
Nitrogen (N)	52	30054	1154 *	17491
N _L ^y	34	69334	123	27867
N _a ^x	1	5707	2231 **	22964
Error (a)	269	28506	176	7891
Hybrids (H)	61	53727	493	20062
Error (b)	135	32627	288	6606

^z : Replications; ^y : linear effect of N; ^x : quadratic effect of N

*, **, *** : Significant at the 0.05, 0.01 and 0.001 probability levels respectively.

Table 4.18. Mean nitrogen harvest index for N derived from alfalfa residues or soil conserved N (NHI_{cons}) on the sandy loam soil (at Saint-Anselme) and on the clay soil (at Saint-Nicolas) in 1993.

N rate (kg N ha ⁻¹)	Sandy loam soil	Clay soil
10	50	57
60	54	33
120	50	42
180	54	48

References

Bock, B.R. 1984. Efficient use of nitrogen in cropping systems. Pages 273-294 dans, Nitrogen in crop production. ASA-CSSA-SSSA. Madison, WI.

Conseil des Productions Végétales du Québec (CPVQ). 1984. Grilles de fertilisation. Ministère de l'Agriculture, des pêcheries et de l'alimentation, Québec.

Conseil des Productions Végétales du Québec (CPVQ). 1989. Plantes fourragères, 2ème édition. Agdex 120/20. Gouvernement du Québec, 249 p.

Conseil des Productions Végétales du Québec (CPVQ). 1994. Grilles de référence en fertilisation. AGDEX 540. Ministère de l'Agriculture, des pêcheries et de l'alimentation du Québec.

Goyal, S.S. and A.A. Hafez. 1990. Quantitative reduction and inclusion of plant tissue nitrates in Kjeldahl digestion. Agron. J. 82:571-576.

Groya, F.L. and C.C. Sheaffer. 1985. Nitrogen from forage legumes : Harvest and tillage effects. Agron. J. 77:105-109.

El-Harris, M.K., V.L. Cochran, L.F. Elliot and D.F. Bezdicsek. 1983. Effect of tillage, cropping, and fertilizer management on soil nitrogen mineralization potential. Soil Sci Soc. Am, J. 47:1157-1161.

Filion, P. 1996. Portrait de la production québécoise de maïs. Pages 9-15 Dans, Compte rendu de conférences, Colloque sur le maïs-grain. Conseil des Productions Végétales du Québec 227 p.

Hardarson, G. and S.K.A. Danso 1993. Methods for measuring biological nitrogen fixation in grain legumes. *Plant and Soil* 152: 19-23.

Harris, G.H. and O.B. Hesterman. 1990. Quantifying the nitrogen contribution from alfalfa to soil and two succeeding crops using nitrogen-15. *Agron. J.* 82:129-134.

Hauck. R.D. 1973. Nitrogen tracers in nitrogen cycle studies-Past and future needs. *J. Environ. Qual.* 2: 317-327.

Hesterman, O.B., C.C. Sheaffer, D.K. Barnes, W.E. Lueschen and J.H. Ford. 1986. Alfalfa dry-matter and nitrogen response in legume corn rotations. *Agron. J.* 78:19-23.

Hesterman, O.B., M.P. Russelle, C.C. Sheaffer, and G.H. Heichel. 1987. N utilization from fertilizer and legume residues in legume-corn rotations. *Agron. J.* 79:726-731.

LaRue, T.A. and T.G. Patterson. 1981. How much nitrogen do legume fix ? *Advan. in Agron.* 34: 15-38.

Liang, B.C., M. Remillard and A.F. Mackenzie. 1992. Effects of hybrids, population density, fertilization and irrigation on grain corn (*Zea mays* L.) in Québec. *Can. J. Plant Sci.* 72:1163-1170.

Liang, B.C. and A.F. Mackenzie. 1994. Corn yield, nitrogen uptake and nitrogen use efficiency as influenced by nitrogen fertilization. *Can. J. Soil Sci.* 74: 235-240.

McCracken, D.V., S.J. Corak, M.S. Smith, W.W. Frye and R.L. Blevins. 1989. Residual effects of nitrogen fertilization and winter cover cropping on nitrogen availability. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53: 1459-1464.

McKeague, J.A. (éd.) 1978. Manual of soil sampling and methods of analysis. Prepared by Can. Soil Survey Committee. Canadian Society of Soil Science, Ottawa, ON. 250 pp.

Paré, T., Chalifour, F.-P., Bourassa, J. and Antoun, H. 1993. Residual effects of faba bean and soybean for a second or third succeeding forage-corn production. Can. J. Plant Sci. 73:495-507.

Pfarr, D.G. 1988. Nitro : a nondormant alfalfa variety for maximum single year production. J. Prod. Agric. 1: 182-183.

Sanchez, C.A. and A.M. Blackmer. 1988. Recovery of anhydrous ammonia-derived nitrogen-15 during three years of corn production in Iowa. Agron. J. 80: 102-108.

Statistical Analysis System Institute, Inc. 1990. SAS user's guide : Statistics. 6 th ed., SAS Institute Inc., Cary, NC.

Senaratne, R. and G. Hardarson. 1988. Estimation of residual N effect of faba bean and pea on two succeeding cereals using ^{15}N methodology. Plant and Soil 100:81-89.

Sheaffer, C.C., D.K. Barnes, G.H. Heichel, G.C. Martens and W.E. Lueschen. 1988. Seeding year nitrogen and dry matter yields of nondormant and moderately dormant alfalfa. J. Prod. Agric. 1:261-265.

Sheaffer, C.C., M.P. Russelle, G.H. Heichel, M.H. Hall and F.E. Thicke. 1991. Nonharvested forage legumes : Nitrogen and dry matter yields and effects on subsequent corn crop. J. Prod. Agric. 4:520-525.

Steel, R.G.D. and J.H. Torrie. 1980. Principles and procedures of statistics : A biometrical approach. McGraw-Hill Publishing Co. NY.

Tran, T., Sen. 1994. Efficacité et devenir de l'engrais azoté marqué (^{15}N) appliqué à la culture de maïs (*Zea mays* L.). Thèse de Doctorat. Université Laval, Saint-Foy. 157 pp.

Van Kessel, C. And J.P. Roskoski, 1988. Row spacing effects on N_2 -fixation, N-yield and soil N uptake of intercropped cowpea and maize. *Plant and Soil* 111: 17-23.

Varvel, G.E. and T.A. Peterson. 1990. Nitrogen fertilizer recovery by corn in monoculture and rotation systems. *Agron. J.* 82:935-938.

Une année de luzerne non dormante (*Medicago sativa* L. cv. Nitro) contribue significativement à l'augmentation du rendement et à la nutrition azotée du maïs-grain (*Zea mays* L.) subséquent. Les chapitres précédents l'ont démontré. En particulier, le Chapitre IV a permis de préciser les quantités d'azote (N) fixées par la luzerne. Il a aussi permis de distinguer les quantités et proportions d'N provenant du fertilisant azoté de celles dérivant des résidus de luzerne et de l'N conservé dans le sol par la légumineuse.

Quelle que soit sa source (sol, engrais ou résidus de cultures), l'azote parvient éventuellement à la solution du sol avant d'être prélevé par les racines des plantes ou encore, avant d'emprunter une autre voie du cycle de l'N. Les résultats obtenus dans les études de l'efficacité d'utilisation de l'N de l'engrais des chapitres précédents suggèrent que des quantités importantes d'N ne sont pas utilisées par le maïs dans les parcelles avec précédent de luzerne et dans les parcelles recevant des doses élevées d'N.

Il était alors important d'effectuer un suivi de l'N minéral du sol. Le prochain chapitre présente le suivi de l'N minéral du sol que nous avons effectué. Cette étude devrait permettre une meilleure appréciation de l'impact de l'inclusion d'une luzerne non dormante dans une monoculture de maïs et de la fertilisation azotée sur l'N minéral du sol dans une région accumulant moins de 2500 unités thermiques maïs (UTM) au Québec.

CHAPITRE V

IMPACT DE LA ROTATION AVEC LA LUZERNE ET DE LA FERTILISATION AZOTÉE SUR LA TENEUR EN AZOTE NITRIQUE DU SOL

IMPACT DE LA ROTATION AVEC LA LUZERNE ET DE LA FERTILISATION AZOTÉE SUR LA TENEUR EN AZOTE NITRIQUE DU SOL

Résumé

L'augmentation des teneurs en nitrates dans les eaux de surface et les nappes phréatiques est de plus en plus préoccupante en régions à courte saison de croissance. De 1992 à 1994, l'impact de la rotation du maïs avec la luzerne et de la fertilisation azotée du maïs a été évalué sur les teneurs en nitrates d'un loam sableux (Podzol ferro-humique) et d'un sol argileux (Gleysol humique) au Québec à trois profondeurs (0-30 cm, 30-60 cm et 60-90 cm). Les teneurs en nitrates du sol ont varié selon l'hybride et ont été affectées par les doses d'N. L'enfouissement des racines et des collets de la luzerne a eu pour effet d'augmenter les quantités de nitrates dans le profil cultural aux deux sites. Les différences ont été plus importantes au printemps suivant l'implantation (1993) et dans la couche de 0 à 30 cm qu'à d'autres périodes et dans d'autres couches. Dans la couche 0-30 cm du loam sableux, les parcelles avec un précédent de luzerne et fertilisées avec 10 kg N ha⁻¹ (L₁₀ - M₁₀) ont présenté des teneurs en N-NO₃⁻ d'environ 138 kg ha⁻¹ alors que celles fertilisées avec 180 kg N ha⁻¹ et avec précédent de maïs (M₁₈₀-M₁₈₀) avaient une teneur moyenne de 86 kg N-NO₃⁻ ha⁻¹. Sur le sol argileux, on a observé 148 kg N-NO₃⁻ ha⁻¹ dans les parcelles L₁₀ - M₁₀ et 71 kg N-NO₃⁻ ha⁻¹ dans les parcelles M₁₈₀-M₁₈₀. Ces différences se sont amoindries pendant les échantillonnages subséquents. En 1994, l'effet du précédent de luzerne s'était estompé et la teneur en nitrates du sol a surtout été affectée par la fertilisation N. En fin de saison, les résultats indiquent très peu d'accumulation d'N minéral dans les couches étudiées quelle que soit la dose d'N appliquée ou le précédent cultural. Ces résultats suggèrent l'existence de pertes d'immobilisations ou d'N importantes dans la rotation et particulièrement à la dose de 180 kg N ha⁻¹.

NITROGEN FERTILIZATION EFFECTS ON SOIL NITRATE-NITROGEN IN ALFALFA-CORN CROPPING SYSTEMS

Abstract

Concerns about increasing concentrations of nitrates (NO_3^-) in surface and ground waters have focused on amounts of residual nitrates in intense cropping systems, under temperate and humid climates. Experiments were conducted from 1992 through 1994 in the province of Quebec (Canada) on a Rivière-du-Loup sandy loam (Humo-ferric Podzol) and on a Kamouraska clay (Humic gleysol) to compare the effect of a single year of alfalfa (*Medicago sativa* L. var Nitro) to corn (*Zea mays* L.) monoculture on residual soil nitrate nitrogen (NO_3^- -N) under three early corn hybrids. Corn hybrids grown in monoculture or preceded by one year of nondormant alfalfa received 10, 60, 120 or 180 kg N ha⁻¹. Soil NO_3^- -N was monitored four times per year from 1992 through 1994 in three layers (0-30; 30-60 and 60-90 cm). Soil NO_3^- -N concentrations differed among hybrids and were affected by N rates. Alfalfa significantly increased NO_3^- -N concentrations in the soil profile the following spring. On the sandy loam soil, in the 0-30 cm layer in 1993, spring NO_3^- -N was 138 kg ha⁻¹ with preceding alfalfa fertilized with 10 kg N ha⁻¹ and 86 kg NO_3^- -N ha⁻¹ with preceding corn fertilized with 180 kg N ha⁻¹. On the clay soil, values were 148 and 71 kg NO_3^- -N ha⁻¹, respectively. The alfalfa effect on residual soil NO_3^- -N decreased with depth and in time. In 1994, no residual effect of alfalfa on soil NO_3^- -N was observed. The risk of nitrate leaching was greater following alfalfa than with continuous corn and especially where 180 kg N ha⁻¹ were applied.

Introduction

Nitrate is recognized as the most common agriculture-related contaminant of surface and ground waters in Quebec (Ministère de l'environnement du Québec (MENVIQ), 1993). Its occurrence in agricultural ecosystems is mainly due to the use of N inputs in excess of those necessary for crop growth and development (MacLean, 1977; Bockman et al., 1990). Fertilizer N recoveries under field conditions seldom exceeds 50 to 60 % even when immobilization is taken into account (Allison, 1966; Isfan, 1994).

Numerous reports have indicated that crops fertilized with inorganic N lose significant amounts of N (Roth and Fox, 1990; Liang and Mackenzie, 1994). In temperate and humid climates as in the province of Quebec (Canada), it is often assumed that soil N is mainly lost through NO_3^- denitrification and leaching (Paré and Chalifour, 1993; Liang and Mackenzie, 1994). Denitrification results in N_2O and NO production which contribute to the ozone layer depletion and increase the "greenhouse effect" (Paré et Chalifour, 1993). Nitrate in drinking water cause human and animal health hazards (Bockman et al., 1990).

In Quebec, there is increasing concern about contamination of groundwater by NO_3^- in areas where corn is grown continuously (Tabi et al., 1990; Liang and MacKenzie, 1991). A survey reported by the MENVIQ (1993) indicated that of 70 wells surveyed in eight municipalities, 68 were contaminated by nitrates and 29 exceeded 10 mg NO_3^- -N L^{-1} (the limit recommended by FAO (1985) in drinking water). Thus, management strategies that reduce NO_3^- losses are needed.

Factors affecting soil NO_3^- occurrence and losses have been documented. These include soil and climate characteristics (Olsen et al., 1970; Knox and Moody, 1991) and cropping systems (MacDonald et al., 1989; Jones and Schwab, 1993). Practices reducing soil NO_3^- concentrations during crop growth and after harvest may help to

reduce NO_3^- leaching (Schertz and Miller, 1972; Wiesler and Horst, 1993). Nitrate leaching over winter has been related to the amounts of residual soil NO_3^- after harvest. The larger the N inputs relative to crop needs, the larger the residual N, the risk of NO_3^- leaching and production costs (Isfan, 1995).

The amounts of residual soil NO_3^- may be also related to the efficiency with which crops utilize available N. Several authors suggested the use of cultivars with high N uptake capacity to reduce residual N accumulation in corn production and hence NO_3^- leaching (Wiesler and Horst, 1993). Many studies have determined high nitrate concentrations under corn (MacDonald et al., 1989; Roth and Fox, 1990; Tran, 1994, Isfan et al., 1995). Others have observed differences in soil NO_3^- among corn hybrids (Wiesler and Horst, 1992 and 1993; Liang et al., 1991).

Field studies have demonstrated differences among commercial corn cultivars in N uptake (Tsai et al., 1984; Wiesler and Horst, 1992) and on soil NO_3^- (Wiesler and Horst, 1993). Fisher (1991) observed that high N uptake cultivars may be especially effective at the beginning of the growing season when leaching is abundant. Other studies however have found no effects of corn hybrids on soil NO_3^- (Liang et al., 1991).

Crop successions may influence soil NO_3^- -N concentrations and distribution. Singh et al. (1978) observed higher NO_3^- losses in corn monoculture than in crop rotations. Olsen et al. (1970) reported that the inclusion of alfalfa in corn monocultures decreased soil NO_3^- . Under high soil N concentrations, N_2 fixation is inhibited and legumes use more of soil N (LaRue and Patterson, 1981). Only when forage legumes are plowed under that leaching losses have been reported to be excessive (Bergström, 1987). Alfalfa may thus be used to reduce soil profile NO_3^- which accumulate under heavily fertilized monocultures (Schertz and Miller, 1972).

In soils with low to moderate mineral N concentrations, legumes may fix considerable amounts of N_2 . Post-season legume residues mineralization releases N into the soil

solution which may be beneficial to succeeding crops. In this respect, legumes are used to reduce the amounts of N fertilizer needed by subsequent nonlegume crops (Fox and Piekielek, 1988). Soil tests have been developed to evaluate nitrogen availability for corn after alfalfa (Bundy and Andraski, 1993, Magdoff et al., 1990). These test identify soil nitrate values at which corn does not respond to additional N fertilizer. The present study attempted to compare the effect of a single year of alfalfa to corn monoculture on residual soil N under three short-season corn hybrids.

MATERIALS AND METHODS

Experiments were conducted from 1992 through 1994 in the province of Quebec (Canada) on a Rivière-du-Loup sandy loam (Humo-ferric Podzol) and on a Kamouraska clay (Humic Gleysol). Soil properties, plot size, plant densities, herbicides, crop successions and other cultural practices were described in previous chapters.

In 1992, half of the experimental plots were seeded with alfalfa and the other half with three early maturing corn hybrids : Northrup King 0565 (NK0565), Pioneer 3979 (P3979) and Pioneer 3962 (P3962). Their respective corn heat unit (CHU) requirements were 2300, 2325 and 2500 CHU. In 1993 and 1994, all plots were seeded with corn. Alfalfa plots received 10 kg N ha⁻¹ at sowing. On each site and in all years, corn plots received 10, 60, 120 or 180 kg N ha⁻¹ in two split banded applications. One fraction (10 or 25 kg N ha⁻¹) was applied at planting and the other fraction (0, 35, 95 or 155 kg N ha⁻¹) at the six- to eight-leaf stage (tassel initiation).

The experimental design was a split-split plot in four replicates at both sites. N rates were the main plot factor, corn hybrids the sub-plot factor and first-year crop (corn or alfalfa) the sub-sub-plot factor. In 1992, all plots were sampled. Due to little differences among corn hybrids on soil N-NO₃⁻ at the end of the growing season in 1992, only plots seeded with hybrid P3979 were investigated in 1993 and 1994. In 1993, plots

preceded by alfalfa or corn receiving 10 kg N ha⁻¹ and those receiving 180 kg N ha⁻¹ preceded by corn were sampled. In 1994, all plots seeded with P3979 and receiving 10, 60, 120 or 180 kg N ha⁻¹ in monoculture or in the rotation were sampled. In addition, in 1993 and 1994, barren fallows were sampled.

Soil core samples were taken from three layers (0-30, 30-60 and 60-90 cm), four times per year : at early spring; at the beginning of stem elongation (before second N fertilizer application), after silking, and in the autumn after harvest. In 1992, the two last sampling dates were July 10th and October 30th. In 1993, sampling dates were May 4th, June 4th, July 21st and September 8th. In 1994, sampling dates were May 3rd, June 22nd, July 26th and November 8th on the sandy loam soil. On the clay soil, the two last sampling dates were July 29th and November 9th. Nitrate concentrations in water extracts were determined by ion chromatography (Dionex, 1988). Exchangeable NH₄⁺ in 2 M KCl extracts was determined colorimetrically by reaction with nitroprusside (McKeague, 1978).

Data were analyzed using SAS (Statistical Analysis System Institute, Inc 1990). Experimental error variances for variables were tested for homogeneity using Bartlett's test (Steel and Torrie, 1980). Due to heterogeneity of variances among sites, analyses were made and presented by site. An analysis of variance (ANOVA) was performed using sampling dates as subplot factor. This allowed the study of the variation of soil NO₃⁻ concentrations at different sampling dates.

In 1992, significance of treatment differences due to N rate and crop (corn or alfalfa) and their interactions were tested using the SAS ANOVA procedure. In 1993 and 1994, the significance of cropping systems (crop successions) was also tested with SAS ANOVA procedure. In 1993, contrasts were used to compare NO₃⁻ concentrations under continuous corn fertilized with 10 or 180 kg N ha⁻¹ with NO₃⁻ concentrations under corn preceded by alfalfa and receiving 10 kg N ha⁻¹. In 1994, significance of treatment

differences due to N rates and first-year crop (monoculture or rotation) and their interactions were also investigated with SAS ANOVA procedure. Contrasts were used to compare soil N-NO_3^- under continuous corn and under corn after first-year alfalfa at all N rates. Polynomial regression contrasts were made to describe soil NO_3^- -N response to applied N.

RESULTS

Selected soil properties on the sandy loam soil and on the clay soil prior to crop establishment in 1992, precipitations and accumulated corn heat units during the growing seasons were presented in Chapter II. Exchangeable NH_4^+ -N was determined throughout this study. Due to its low concentrations compared to NO_3^- -N and the absence of treatment differences, exchangeable NH_4^+ -N data are not presented or discussed.

Year 1992

On the clay soil, there were no differences for soil NO_3^- -N among treatments at all sampling dates (data not shown). On the sandy loam soil, no differences were observed among treatments for soil NO_3^- -N during the first two sampling dates (data not shown). On the third sampling date (July 10) in the 60 - 90 cm layer, the effect of N rate on soil NO_3^- -N was different among corn hybrids (N x H, Tables 5.1 and 5.2). Soil NO_3^- -N concentrations were similar for all three hybrids at lower N rates but were larger under P3979 at 120 and 180 kg N ha⁻¹ compared to NK0565 or P3962.

At the end of the growing season (October 30) on the sandy loam soil, no differences were observed in soil NO_3^- -N contents in the 0 - 30 cm soil layer at all N rates. In contrast, significant differences occurred among N rates for residual NO_3^- -N in the subsoil (30 - 60 cm and 60 - 90 cm). Residual soil NO_3^- -N increased with increasing N rates (N_L , Table 5.1; Fig. 5.1).

Year 1993

Early spring sampling (May 4)

Preceding alfalfa significantly increased NO_3^- -N in the soil profile at early spring (Table 5.3 and Fig. 5.2). At both sites, in the 0 - 30 cm soil layer, soil N- NO_3^- contents were larger after alfalfa in plots which received only 10 kg N ha⁻¹ (A10N-C10N) compared to monocultured corn plots which received 10 or 180 kg N ha⁻¹ (C10N-C10N or C180N-C180) the preceding year (Table 5.3; Fig. 5.2).

In the 30-60 cm layer of the sandy loam soil, significantly larger NO_3^- -N concentrations were found in A10N-C10N plots compared to C10N-C10N plots (Table 5.3; Fig. 5.2). Similar soil N- NO_3^- contents were found between rotation plots (A10N-C10N) and continuous corn plots receiving the higher N rate (C180N-C180N).

On the clay soil, soil NO_3^- -N content in the 0 - 30 cm soil layer was larger in fallows than in all other plots at all N rates (Table 5.3; Fig. 5.2). The barren fallows were previously seeded with bromegrass and received 10 kg N ha⁻¹. In the subsoil however, soil NO_3^- -N concentrations were larger in corn plots compared to fallows (Table 5.3; Fig. 5.2).

Second sampling (June 4)

The second soil sampling occurred after the first N application. Larger soil NO_3^- -N were still observed in plots with preceding alfalfa compared to those with preceding corn at all N rates (Table 5.3; Fig. 5.3). On the sandy loam soil, in the 0 - 30 cm soil layer, there was significantly more NO_3^- -N in fallows compared to all plots with preceding corn. In all soil layers, more NO_3^- -N was found in A10N-C10N plots compared to C10N-C10N plot (Table 5.3; Fig 5.3).

On the clay soil, differences were less pronounced. However, more NO_3^- -N was found in A10N-C10N plots compared to C10N-C10N plots in the 30-60 cm and 60-90 cm soil layers (Table 5.3).

Third sampling (July 21)

On the sandy loam soil, similar NO_3^- -N were found in the soil profile of all treatments. On the clay soil, soil NO_3^- -N concentrations were significantly lower in fallows than in all corn plots (Table 5.3; Fig 5.3).

End of the growing season (September 8)

At both sites, soil NO_3^- -N contents were significantly higher in fallows than in corn plots in all three soil layers (Table 5.3; Fig 5.2). Significant differences were also observed among crop successions for soil NO_3^- -N content (Table 5.3; Fig 5.2).

On the sandy loam soil, soil NO_3^- -N contents were larger under continuous corn receiving 180 kg N ha^{-1} (C180N - C180N) compared to the rotation receiving 10 kg N ha^{-1} (A10N - C10N) in the subsoil (Table 5.3; Fig 5.2). Similar differences were observed only at the 60 - 90 cm soil layer on the clay soil. No differences were found in soil NO_3^- -N content between A10N-C10N plots and C10N-C10N plots in all soil layers.

The variation in soil NO_3^- -N in the 0-30 cm soil layer at both sites throughout the season indicated larger availability of NO_3^- -N in plots with preceding alfalfa compared to plots with preceding corn whatever the amount of fertilizer N previously applied early in the season (Table 5.4; Fig. 5.3). Soil NO_3^- -N were comparable among crop successions at both sites at early spring (May 4) but became lower on the clay than the sandy loam on June 4. In subsequent samplings, fertilizer N increased soil N- NO_3^- . At the end of the growing season, soil NO_3^- -N concentrations were much larger at the highest N rate (180 kg ha^{-1}) than at lower N rates on the sandy loam soil. In the clay soil, residual soil NO_3^- -N was lower compared to the sandy loam soil and was not affected by N rates or previous crop (Table 5.3; Fig 5.3).

Year 1994

Two years after alfalfa, there was no effect of first-year alfalfa on soil NO_3^- -N at both sites at all sampling dates (Table 5.4; Fig. 5.4). The only differences observed existed

between the fertilized corn plots and fallows. Soil NO_3^- -N content was larger under fallows. On the sandy loam soil, crop successions differed in soil NO_3^- -N contents among sampling dates (CS x D, Table 5.6; Fig. 5.5). Soil NO_3^- -N contents were larger on June 4 in all crop successions.

On the clay soil, significant differences occurred among sampling dates for soil NO_3^- -N (Table 5.6; Fig. 5.6). Soil NO_3^- -N contents were larger on June 4 compared to May 4. Also, soil NO_3^- -N contents were larger on July 21 compared to June 4.

DISCUSSION

The larger NO_3^- -N concentrations found under alfalfa compared to corn at the end of the growing season in 1992 can be attributable to the sparing effect of alfalfa on soil N sources and to N_2 fixation by the alfalfa crop. When soil N is limiting, alfalfa can fix appreciable amounts of atmospheric N_2 (LaRue and Patterson, 1981). In Chapter IV we have determined that alfalfa Nitro forage derived 76 and 57 kg N ha^{-1} from symbiotic N_2 fixation on the sandy loam soil and on the clay soil, respectively.

At the beginning of the growing season in 1993, the larger amounts of soil N- NO_3^- in the 0-30 cm soil layer indicate that more N was being released in plots with preceding alfalfa compared to plots with preceding corn. These amounts of soil NO_3^- -N presumably resulted from the mineralization of easily labile alfalfa roots and crown residues compared to corn stover and roots. Measured soil NO_3^- -N in the 0-30 cm soil layer in spring after a single year of nondormant alfalfa were equivalent to 51 and 54 kg N ha^{-1} on the sandy loam soil and on the clay soil, respectively. Although these amounts include native soil N- NO_3^- , they agree with the N credits of 40 to 70 kg N ha^{-1} presently recommended for alfalfa roots plowdown in Quebec (CPVQ, 1996).

Our study provides experimental evidence of recommendations which were not obtained from previous local experimentation. Most data used by farm advisors to credit N from previous crops are still derived from studies conducted outside the province of Quebec (Barnett, 1996) but, from areas with similar climatic and growth conditions.

The abundant soil NO_3^- -N found at early spring sampling in 1993 demonstrate that net mineralization of organic N occurred during the period from autumn to early spring in excess to leaching and denitrification losses. Similar conclusions were reached by Liang et al. (1991). In contrast, other studies conducted under northern climates have reported lower spring soil NO_3^- -N at the higher N rates compared to the amounts of soil NO_3^- -N measured in the same plots the previous autumn. These include reports by Olsen et al. (1970) in Wisconsin and Guillard et al. (1995) in Connecticut.

The differences in amounts of soil NO_3^- -N between plots with preceding alfalfa and those with preceding corn, both receiving 10 kg N ha^{-1} indicate that the alfalfa effect on soil NO_3^- -N lasted through mid-July on the sandy loam soil and through late August on the clay soil. After those periods, most of the N from easily labile alfalfa residues was exhausted. For the second corn crop, no first-year alfalfa effect on soil NO_3^- -N was observed at all sampling dates. Thus, in areas with conditions similar to our experiment, no N credit should be proposed for a second corn crop after alfalfa roots and crowns plowdown. In Michigan, Harris and Hesterman (1990) also reported that N from ^{15}N labelled alfalfa residues remaining in the soil after corn harvest was not available for uptake by a second year spring barley crop.

Providing N to soil at early spring may not be fully beneficial to corn. In Quebec, corn is sown in mid-May but the peak in N demand occurs in July and August. Thus, there was an apparent lack of synchronism between soil N mineralization from alfalfa residues and corn N needs. Large amounts of N from alfalfa were lost before corn plants were in an exponential phase for N uptake. The use of alfalfa as N source for a subsequent

non legume may be more adequate for a crop with a shorter life cycle such as wheat (*Triticum aestivum* L.).

The use of the nitrate soil test at early spring has been tested in the Quebec province to adjust fertilizer N recommendations (Tran, 1996). When early season soil NO_3^- -N concentration is above 25 mg kg^{-1} of soil, there is little N response and fertilizer N should be adjusted accordingly (Magdoff et al., 1990). Other studies suggest that the pre-sidedress nitrate value at which corn does not respond to additional N fertilizer is between 21 and 30 ppm N (Bundy and Andrasky (1993). Under our experimental conditions, these tests for soil nitrates may have been misleading for corn after alfalfa. The abundance of soil nitrates at early spring due to the previous legume crop did not ensure higher corn yields in plots receiving 10 kg N ha^{-1} compared to plots fertilized with 180 kg N ha^{-1} (Chapter II). Tran (1996) recommended that additional N has to be provided to ensure adequate crop growth even with nitrate contents above 25 mg kg^{-1} of soil.

Our conclusions are based on estimates following a single year of nondormant alfalfa. With dormant cultivars maintained for several years, legume N input in the system and potential N losses may be higher than with a single rotation year. In Michigan, Harris and Hesterman (1990) observed that more N from alfalfa plant material remained in the soil and was lost from the system than recovered by a subsequent corn crop.

Larger levels of soil NO_3^- -N at the end of the growing season in the alfalfa-corn rotation indicate a greater risk of ground water pollution than in the corn monoculture when properly fertilized. In a continuous corn sequence in southeast Quebec, Isfan et al. (1995) also observed increases in NO_3^- -N concentrations in the 100 cm soil profile with increasing N fertilizer rates. Soil NO_3^- -N content was larger in the top 40 cm soil layer at the end of the growing season. Similar increases in mineral N in the top soil were also observed by Wiesler and Horst (1993) and were related to abundant root decay in the top soil.

In Chapter II, we reported larger N uptake by corn in plots receiving higher N rates. However, this N uptake may not explain in full, the absence of significant differences in soil NO_3^- -N in 1992 and 1994 in the 0-30 cm layer among N rates. Denitrification and NO_3^- leaching may have contributed to larger N losses in plots receiving higher amounts of N fertilizer. Important denitrification potential was determined in plots receiving 180 kg N ha⁻¹ (Chantigny, 1995). Isfan et al. (1995) suggested that part of the N fertilizer applied at planting was already leached below the top 100 cm soil layer at harvest. No evidence of soil NO_3^- -N accumulation in the 0 - 90 cm was observed in this study. Most of the residual soil N was lost in late autumn and winter. Similar observations were made by Liang et al. (1991) and Liang and Mackenzie (1994) under corn in Southwestern Quebec even with N rates as high as 400 kg ha⁻¹. They attributed the lack of accumulation of NO_3^- -N to leaching and denitrification during winter. In a study implicating several soils in Quebec and using ¹⁵N as tracer, Tran (1994) determined residual N fertilizer in soil profiles after corn harvest and the following spring. Residual fertilizer N varied according to climatic conditions and soil texture. In dry years, 15 to 25 % of residual N was derived from fertilizer applied in the previous year whereas in humid years, this proportion was less than 5 %.

Amounts of N fertilizer that cannot be accounted for by crop uptake are not necessarily lost. After one year of ammonium nitrate or urea application, Timmons and Cruse (1991) reported that 16 to 27 % of the fertilizer was found in organic forms and only 1 % in the mineral pool. Kowalenko (1978) determined that about 20 % of fertilizer N was immobilized in soil organic forms and the amount involved remained fairly constant throughout the growing season. At lower N rates, most of the N fertilizer enters the soil organic N pool (Broadbent and Carlton, 1978). Immobilization of fertilizer N was 28 and 37 % with applied 84 and 168 kg N ha⁻¹, respectively (Kitur et al., 1984). Tran (1994) reported fertilizer N immobilization in organic forms in Quebec soils to be 14 to 34 % of the applied N rates, but values varied with soil clay content. The accounted fertilizer N losses varied from 10 to 14 % in dry years and 30 to 39 % in humid years or in soil with

high hydraulic conductivity. The use of ^{15}N -depleted tracer in our experiment did not allow a follow up of fertilizer N in the soil.

Our study demonstrated differences among corn hybrids relative to the amounts of soil NO_3^- -N concentrations. Hybrid P3979 was a well adapted hybrid in terms of climatic requirements for grain maturing. At high soil N however, soil NO_3^- -N concentrations were larger under P3979 compared to hybrids NK0565 and P3962. In Chapter III the same three hybrids were evaluated for N uptake. Significant differences were found among corn hybrids for N uptake in all years. Hybrid P3979 fertilizer N uptake capacity was lower compared to the other hybrids. This hybrid should be grown with no more than 120 kg N ha^{-1} . The behavior of hybrid P3979 may be an indication short-season corn hybrids should not be grown with the same N rates recommended for late-maturing hybrids. In our conditions, the low precipitation level recorded in 1992 may have favored the expression of hybrid differences on soil NO_3^- -N. These results agree with those of Wiesler and Horst (1993). Differences in hybrids soil NO_3^- -N utilization as measured by differences in amounts of soil NO_3^- -N were explained by a positive correlation with root length densities at silking (Wiesler and Horst, 1993). In contrast, Llang et al. (1991) have observed no effect of hybrid on soil NO_3^- -N in an experiment conducted in Southern Quebec. However, hybrids characteristics were not indicated and soil samples were taken in the spring and after harvest in autumn when hybrid differences are less likely to occur.

In general, fertilizer and previous alfalfa effects were smaller on the clay soil compared to the sandy loam soil. On the clay soil, larger input of NO_3^- -N from the mineralization of native soil organic matter may have hindered alfalfa and fertilizer effects on soil NO_3^- -N. High denitrification potential and more sequestration of organic N in soil aggregates (Chantigny, 1995) may also explain the low soil mineral N content of the clay soil. Soil texture and particularly soil clay content was related to potential N mineralization rates in meadow soils from Quebec (Simard and N'Dayegamiye, 1993). Soil texture and the cropping system are important factors affecting soil nitrates in the soil profile.

Conclusions

Hybrid differences on soil NO_3^- -N suggest that fertilizer rates should be adjusted according to corn maturity groups to reduce excess residual NO_3^- -N in the soil and improve fertilizer N use efficiency. Hybrid Pioneer 3979 was one of the most adapted corn hybrid in terms of climatic requirements but this hybrid left larger NO_3^- -N amounts in the soil. Hybrid Pioneer 3979 was not suited for high N fertilizer application.

A single year of nondormant alfalfa significantly increased soil NO_3^- -N in the soil profile the following spring. Early spring soil NO_3^- -N agreed well with present local recommendations for the N credit to allow to corn from previous alfalfa roots and crowns plowdown. The alfalfa effect however lasted only one season and no N credit should be provided to a second corn crop.

Given the corn growth pattern in Quebec, full synchronism was not achieved between early spring high N rates and mid-season corn high N needs. Thus, the contribution to soil N by previous nondormant alfalfa var. Nitro was not fully beneficial to corn and important amounts of N from alfalfa may have been lost by leaching and denitrification. This consideration may be important when using the test for nitrates at planting in the rotation. Large amounts of soil nitrates due to the legume may not ensure adequate corn yields.

The absence of NO_3^- -N accumulation during the experimental period suggests active loss of nitrates particularly the first spring after alfalfa and where high fertilizer rates (180 kg N ha^{-1}) were applied after alfalfa. In addition to taking into account N inputs from previous legumes, nitrogen fertilization should consider the relatively low N uptake by early corn hybrids to avoid significant N losses by leaching and/or denitrification.

Table 5.1. Summary of the analyses of variance of soil NO₃⁻ concentrations on the sandy loam soil (at Saint-Anselme) and on the clay (at Saint-Nicolas) soil in 1992.

Sources	df	SANDY LOAM SOIL			CLAY SOIL		
		0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm	0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm
<i>July 10, 1992^w</i>							
----- mean squares -----							
Rep ^z	3	3227	55	100	1487 *	640 *	544 **
Nitrogen (N)	3	1547	59	61	461	34	203
Error (a)	9	2563	543	99	572	127	72
Hybrids (H)	2	777	383	726 **	726	24	11
N x H	6	2499	276	266 *	587	145	73
Error (b)	24	2698	324	100	386	128	107
<i>October 30, 1992^v</i>							
----- mean squares -----							
Rep ^z	3	157	40 **	15 *	587	199	1823 *
Nitrogen (N)	3	13	35 **	20 *	586	36	131
N _L ^y	1	3.6	96 **	44 *	878	70	12
N _Q ^x	1	21	7.1	13	869	1.1	382
Error (a)	9	49	4.9	3.3	588	81	282

^z : Replicates; ^y : linear effect of N; ^x : quadratic effect of N

^w : 57 and 49 days after planting on the sandy loam soil and on the clay soils, respectively

^v : 168 and 160 days after planting on the sandy loam and on the clay soils, respectively

*, **, *** : Significant at the 0.05, 0.01 and 0.001 probability levels, respectively.

Table 5.2. Mean nitrate concentrations on the sandy loam soil (at Saint-Anselme) and on the clay soil (at Saint-Nicolas) at two sampling dates under corn hybrids Northrup King 0565 (NK0565), Pioneer 3979 (P3979) and Pioneer 3962 (P3962) at three soil layers (0-30, 30-60 and 60-90 cm) during the 1992 growing season.

N rates	NK0565			P3979			P3962		
	0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm	0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm	0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm
----- mg kg ⁻¹ -----									
SANDY LOAM SOIL									
<i>July 10, 1992^z</i>									
10	55 ± 18	28 ± 11	12 ± 7	81 ± 19	22 ± 7	15 ± 8	72 ± 18	37 ± 15	13 ± 2
60	117 ± 39	23 ± 9	12 ± 7	68 ± 27	30 ± 9	13 ± 4	69 ± 19	21 ± 6	9 ± 8
120	40 ± 20	18 ± 5	6 ± 3	110 ± 44	42 ± 9	39 ± 11	59 ± 24	20 ± 18	7 ± 6
180	75 ± 18	19 ± 6	10 ± 9	42 ± 15	33 ± 11	22 ± 10	56 ± 21	22 ± 16	15 ± 10
<i>October 30, 1992^y</i>									
10	20 ± 3	9 ± 4	3 ± 2	19 ± 9	5 ± 3	3 ± 3	15 ± 7	5 ± 2	2 ± 1
60	21 ± 3	8 ± 3	6 ± 2	17 ± 7	5 ± 2	2 ± 1	14 ± 8	6 ± 3	5 ± 2
120	19 ± 9	13 ± 6	7 ± 4	16 ± 9	4 ± 4	3 ± 1	12 ± 3	7 ± 3	8 ± 4
180	16 ± 8	9 ± 3	4 ± 1	19 ± 6	11 ± 6	4 ± 2	17 ± 9	9 ± 6	7 ± 5
CLAY SOIL									
<i>July 10, 1992^z</i>									
10	33 ± 8	29 ± 14	20 ± 8	35 ± 5	32 ± 12	22 ± 7	31 ± 2	36 ± 13	21 ± 7
60	32 ± 4	30 ± 12	17 ± 11	29 ± 3	38 ± 9	23 ± 8	30 ± 4	34 ± 19	23 ± 5
120	27 ± 4	37 ± 13	29 ± 6	27 ± 4	29 ± 5	26 ± 3	32 ± 5	24 ± 8	29 ± 16
180	28 ± 5	28 ± 6	36 ± 28	29 ± 4	27 ± 13	24 ± 10	29 ± 3	39 ± 16	26 ± 5
<i>October 30, 1992^y</i>									
10	13 9	2 1	15 ± 5	13 ± 9	4 ± 3	18 ± 9	22 ± 18	8 ± 4	25 ± 9
60	15 11	10 6	13 ± 9	12 ± 7	4 ± 3	25 ± 14	10 ± 6	7 ± 4	23 ± 10
120	15 9	5 3	20 ± 9	9 ± 5	5 ± 3	19 ± 10	17 ± 13	8 ± 6	33 ± 7
180	28 12	6 3	13 ± 7	17 ± 7	12 ± 4	14 ± 7	37 ± 15	7 ± 4	27 ± 12

^z : 57 and 49 days after planting on the sandy loam and clay soils, respectively

^y : 168 and 160 days after planting on the sandy loam and on the clay soils, respectively.

Table 5.3. Summary of the analyses of variance of soil nitrate concentrations at four sampling dates on the sandy loam soil (at Saint-Anselme) and on the clay soil (at Saint-Nicolas) in 1993.

Sources of variation	df	SANDY LOAM SOIL			CLAY SOIL		
		0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm	0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm
----- mean squares -----							
<i>May 4, 1993</i>							
Rep ^z	3	70	65	16	167	36	18
Crop successions	5	645 **	339 *	78	907 **	47	45
Fallow vs others	1	18.9	130	98	1640 **	115 *	114 *
A10N-C10N vs C10N-C10N	1	2497 ***	1070 **	156	1697 **	110	43
A10N-C10N vs C180N-C180N	1	1093 **	119	2.24	2553 ***	17.3	7.5
Error	15	106	110	48	132	25	17
<i>June 4, 1993^w</i>							
Rep ^z	3	109	403	297	90	151	12
Crop successions	5	2763 ***	1539	124	292	620	70 *
Fallow vs others	1	2798 *	99	30	44	17	117 *
A10N-C10N vs C10N-C10N	1	9700 ***	7088 *	511 *	504	2309 *	131 *
A10N-C10N vs C180N-C180N	1	2112 *	2912	65	1028 *	1543 *	4.5
Error	15	332	915	104	179	320	22
<i>July 21, 1993^y</i>							
Rep ^z	3	2595	401	97	786	911	58
Crop successions	5	2037	429	288	3558 *	2951	113
Fallow vs others	1	993	196	17	4220 *	773	270 *
A10N-C10N vs C10N-C10N	1	40	443	271	2654	20	24
A10N-C10N vs C180N-C180N	1	3283	95	107	1195	5203	63
Error	15	3323	1475	313	1203	2792	41
<i>September 8, 1993^u</i>							
Rep ^z	3	2753	1028	163	22	176 *	86 *
Crop successions	5	5359 *	8440 **	1503 **	349	648 ***	322 ***
Fallow vs others	1	21026 ***	33270 **	5143 ***	1427 **	3036 ***	1337 ***
A10N-C10N vs C10N-C10N	1	151	97	110	92	0.2	7.4
A10N-C10N vs C180N-C180N	1	2262	5065 *	1219 *	26	134	156 *
Error	15	1217	870	235	129	33	21

^z : Replication; ^y : linear effect of N; ^x : quadratic effect of N

^w : 12 and 4 days after planting on the sandy loam and on the clay soils, respectively

^y : 59 and 51 days after planting on the sandy loam and on the clay soil, respectively

^u : 108 and 100 days after planting on the sandy loam and on the clay soil, respectively

*, **, *** : Significant at the 0.05, 0.01 and 0.001 probability levels, respectively.

Table 5.4. Summary of the analyses of variance for the variations of soil nitrate concentrations in the 0-30 cm soil layer on the sandy loam soil (at Saint-Anselme) and on the clay soil (at Saint-Nicolas) in 1993.

Sources of variations	df	mean squares	
		SANDYLOAM SOIL	CLAY SOIL
Rep ^z	3	1676	347
Crop successions (CS)	5	5938 *	2066 *
Fallow vs others	1	13336 *	4668 **
A10N-C10N vs C10N-C10N	1	6971 *	3942 *
A10N-C10N vs C10N-C10N	1	5894	2069 *
A10N-C10N vs C60N-C60N	1	934	38
A10N-C10N vs C120N-C120N	1	3019	674
Error (a)	15	1633	497
Date (D)	3	11591 ***	12906 ***
May 4 vs June 4	1	2389	5168 ***
June 4 vs July 21	1	7040 *	31518 ***
July 21 vs September 8	1	1115	26185 ***
CS x D	15	1636	1015 **
Error (b)	54	1159	358

^z: Replicates

Table 5.5. Summary of the analyses of variance of soil nitrate concentrations at four sampling dates on the sandy loam soil (at Saint-Anselme) and on the clay (at Saint-Nicolas) in 1994.

Sources of variation	df	SANDY LOAM SOIL			CLAY SOIL		
		0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm	0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm
----- mean squares -----							
<i>May 3, 1994</i>							
Rep ^z	3	149	28	16	30	16	8
Crop successions	5	109	35	39	30	18	29 ·
Fallow vs others	1	24	4.6	14	0.3	51	86 **
A10N-C10N-C10 vs C10-C10N-C10N	1	57	4.4	8	11	7	2
A10N-C180N-C180 vs C180-C180N-C180N	1	125	0.7	0.4	101	11	10
Error	24	55	51	24	64	20	9
<i>June 22, 1994^w</i>							
Rep ^z	3	5222	210	19	512	119	21
Crop successions	5	11774	462	57	242	249	4
Fallow vs others	1	36729 ·	166	4	447	66	9
A10N-C10N-C10 vs C10-C10N-C10N	1	743	7	33	124	179	1
A10N-C180N-C180 vs C180-C180N-C180N	1	535	415	54	134	65	0.2
Error	24	5405	323	72	261	459	18
<i>July 26, 1994^v</i>				<i>July 29, 1994^u</i>			
Rep ^z	3	1131	68	80	408	157	29
Crop successions	5	1797 ·	465	172	1163 ·	335	75
Fallow vs others	1	5	1147	44	243	990 ·	24
A10N-C10N-C10 vs C10-C10N-C10N	1	83	711	318	4	0.8	3
A10N-C180N-C180 vs C180-C180N-C180N	1	45	41	7	3200*	399	67
Error	24	591	310	138	211	162	34
<i>November 8 th 1994^t</i>				<i>November 9 th 1994^s</i>			
Rep ^z	3	38	26	158	991 ***	689 ***	35
Crop successions	5	283	143	228	82	183 ***	229 ***
Fallow vs others	1	422	239	1252 **	30	1258 ***	1490 ***
A10N-C10N-C10 vs C10-C10N-C10N	1	70	0.1	3	40	10	0.7
A180N-C180N-C180 vs C180-C180N-C180N	1	497	53	28	218	6	10
Error	24	171	68	124	123	28	7

^z : Replicates; ^y : linear effect of N; ^x : quadratic effect of N

^w : 38 and 34 days after planting on the sandy loam and the clay soils, respectively

^v : 72 days after planting on the sandy loam soil

^u : 71 days after planting on the clay soil

^t : 177 days after planting on the sandy loam soil

^s : 174 days after planting on the clay soil

·, **, *** : Significant at the 0.05, 0.01 and 0.001 probability levels, respectively.

Table 5.6. Summary of the analyses of variance for the variations of soil nitrate concentrations in the 0-30 cm soil layer on the sandy loam soil (at Saint-Anselme) and on the clay soil (at Saint-Nicolas) in 1994.

Sources of variations	df	mean squares	
		Sandy loam soil	Clay soil
Rep ^z	3	1813	777 **
Crop successions (CS)	8	5345 *	384
Fallow vs others	1	11730 *	126
A10N-C10N-C10N vs C10N-C10N-C10N	1	104	78
A10N-C60N-C60 vs C60N-C60N-C60	1	815	67
A10N-C120N-C120 vs C120N-C120N-C120	1	6039	323
A10N-C180N-C180 vs C180N-C180N-C180N	1	362	707
Error (a)	24	1888	177
Date (D)	3	150444 ***	9066 ***
May 4 vs June 4	1	309101 ***	24233 ***
June 4 vs July 21	1	233983 ***	11646 ***
July 21 vs September 8	1	10404 **	181
CS x D	24	2885 *	235
Error (b)	81	1473	181

^z: Replicates

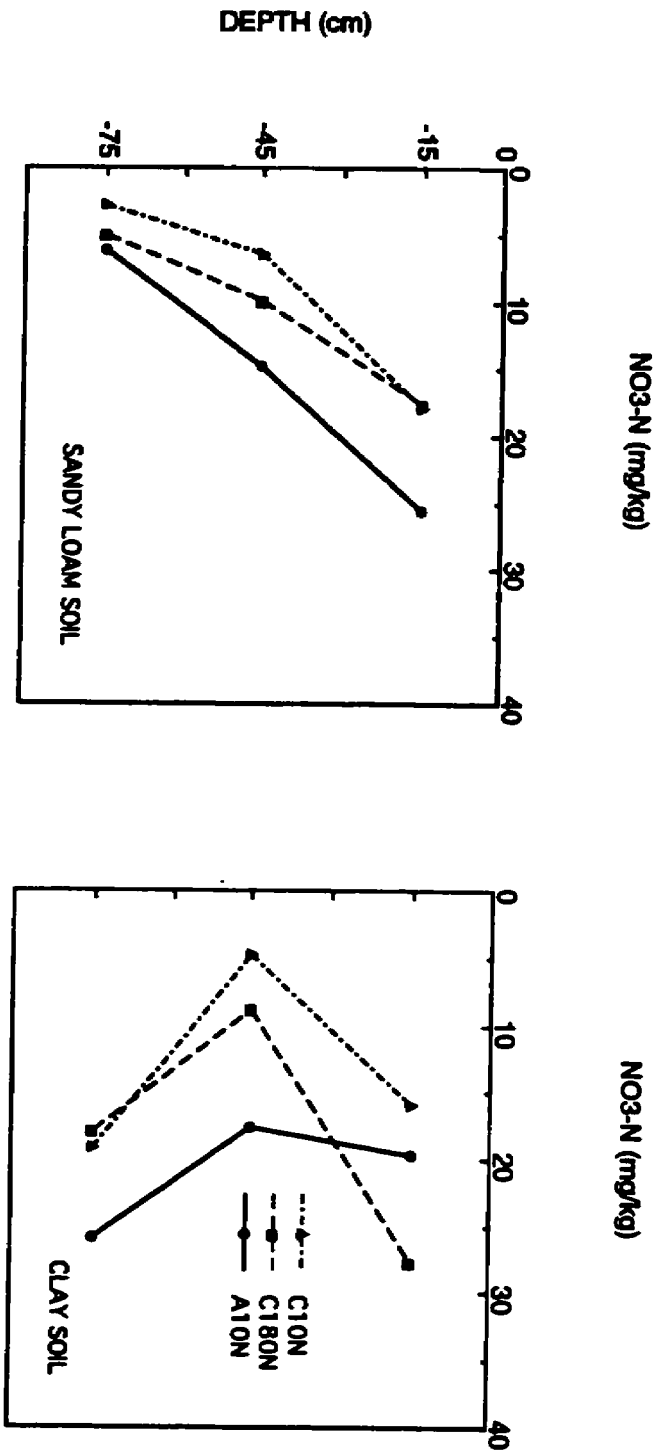


Figure 5.1. Residual soil nitrate concentrations (in mg/kg) on the sandy loam soil at Saint-Anselme and on the clay soil at Saint-Nicolas in three soil layers after alfalfa fertilized with 10 kg N/ha (A10) and corn fertilized with 10 or 180 kg N/ha (C10N or 180N) on October 30, 1992.

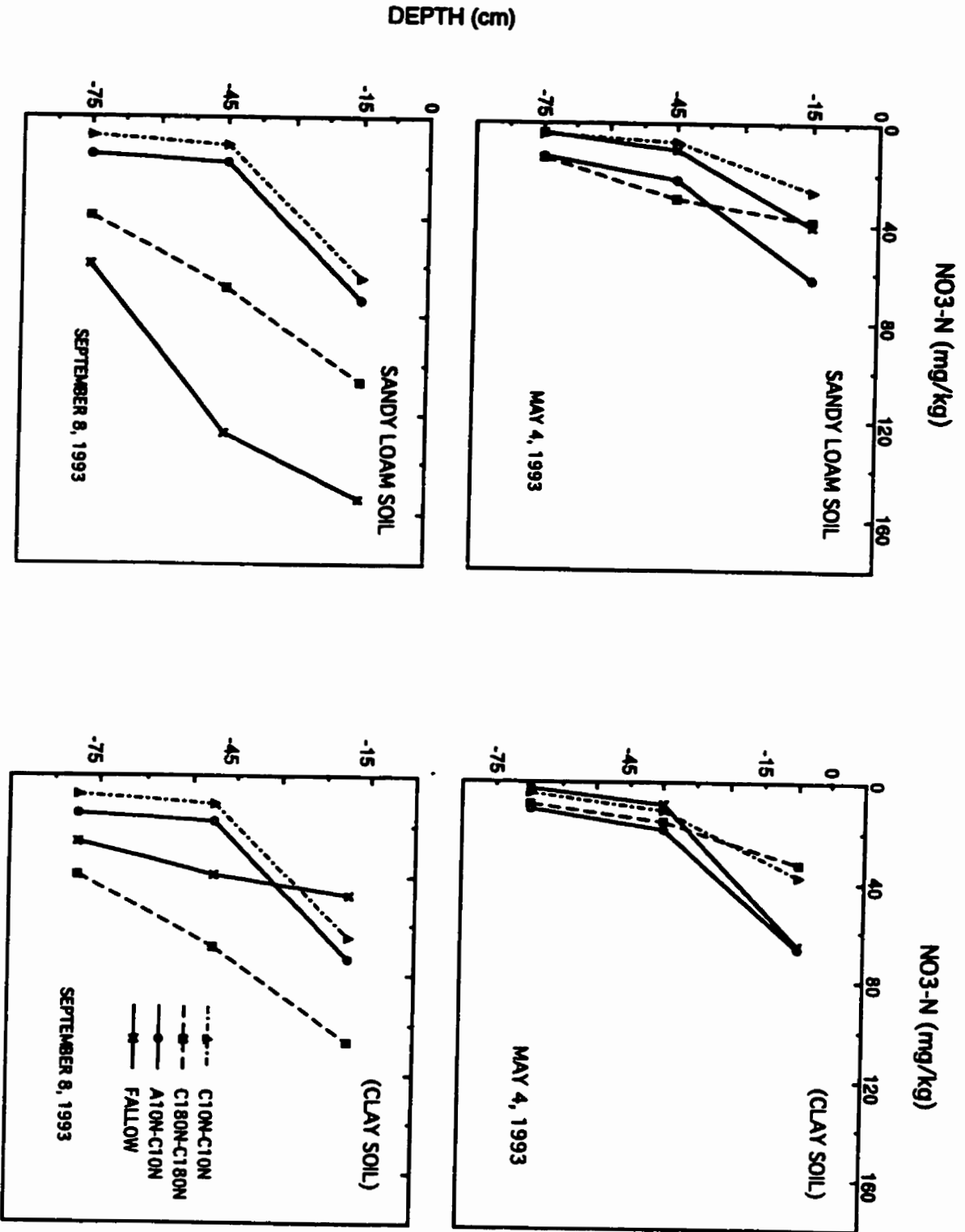


Fig. 5.2. Soil nitrate concentrations (in mg/kg) in three layers and two N rates (10 or 180 kg N/ha) on the sandy loam soil (at Saint-Anselme and on the clay soil (at Saint-Nicolas) for cropping systems at early spring and at the end of the growing season in 1993. Corn was preceded by either alfalfa (A10N-C10N) or corn (C10N-C10N or C180-C180N).

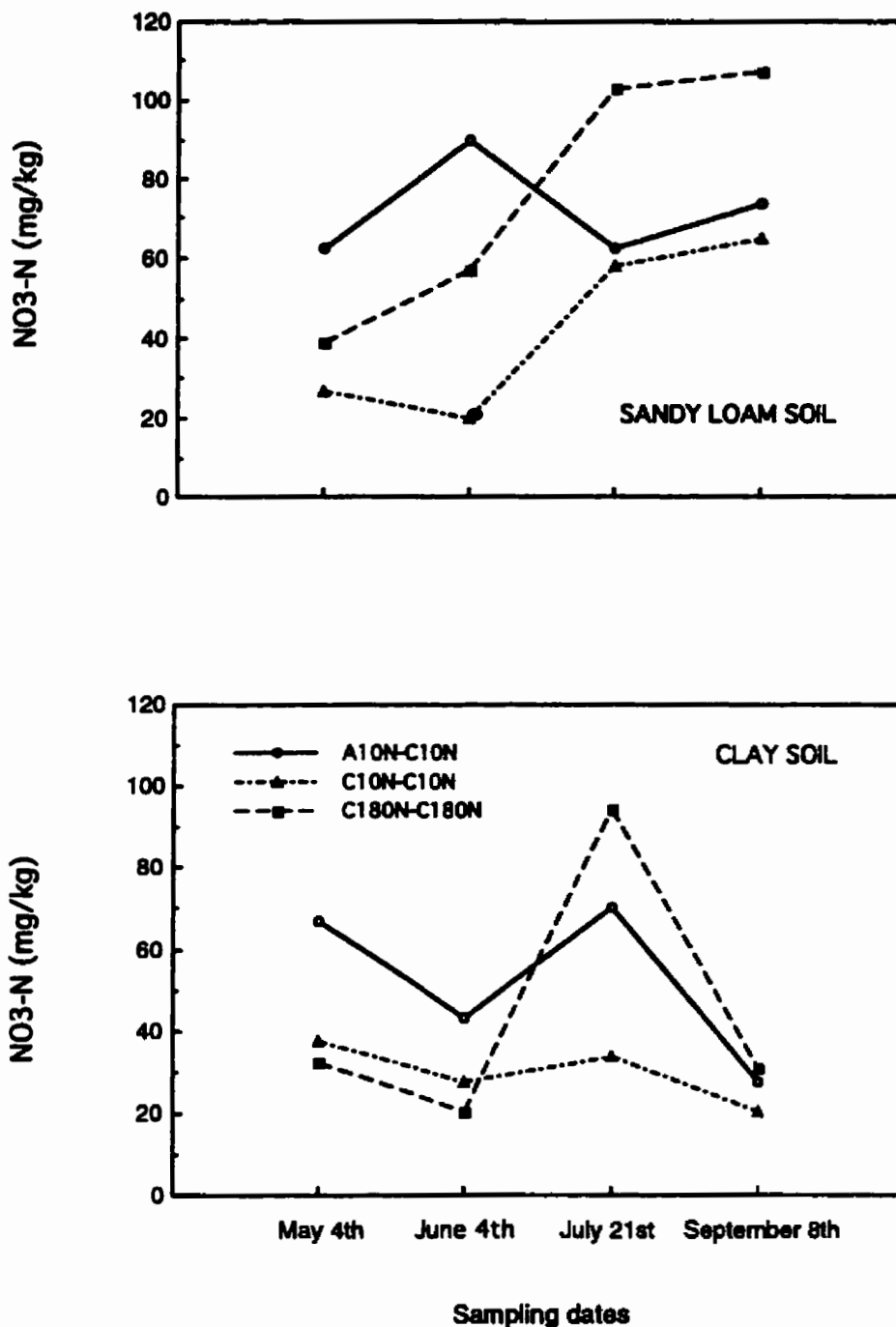


Fig. 5.3. Variations of nitrate concentrations in the 0-30 cm soil layer in 1993 on the sandy loam soil (at Saint-Anselme) and on the clay soil (at Saint-Nicolas) at four sampling dates for corn after alfalfa fertilized with 10 kg N/ha (A10N-C10N) and continuous corn fertilized with 10 or 180 kg N/ha (C10N-C10N or C180N-C180N).

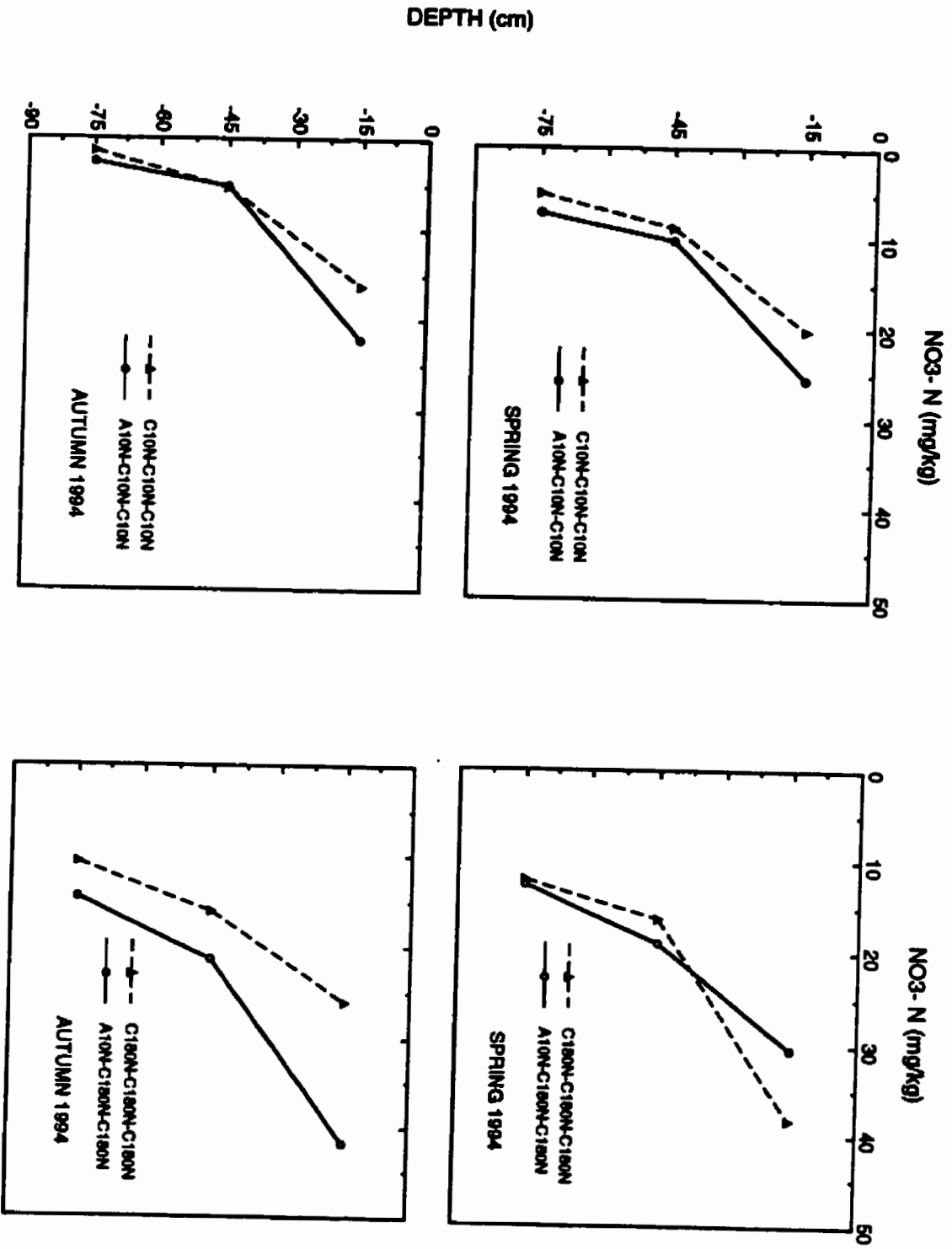


Fig. 5.4. Soil nitrate concentrations (in mg/kg) in three layers and two N rates (10 or 180 kg N/ha) on the sandy loam soil (at Sahlt-Anselme) for crop successions at early spring and at the end of the growing season in 1994. Corn was preceded by first-year alfalfa (A10N-C10N-C10N or A180N-C180N-C180N) or corn (C10N-C10N-C10N or C180N-C180N-C180N).

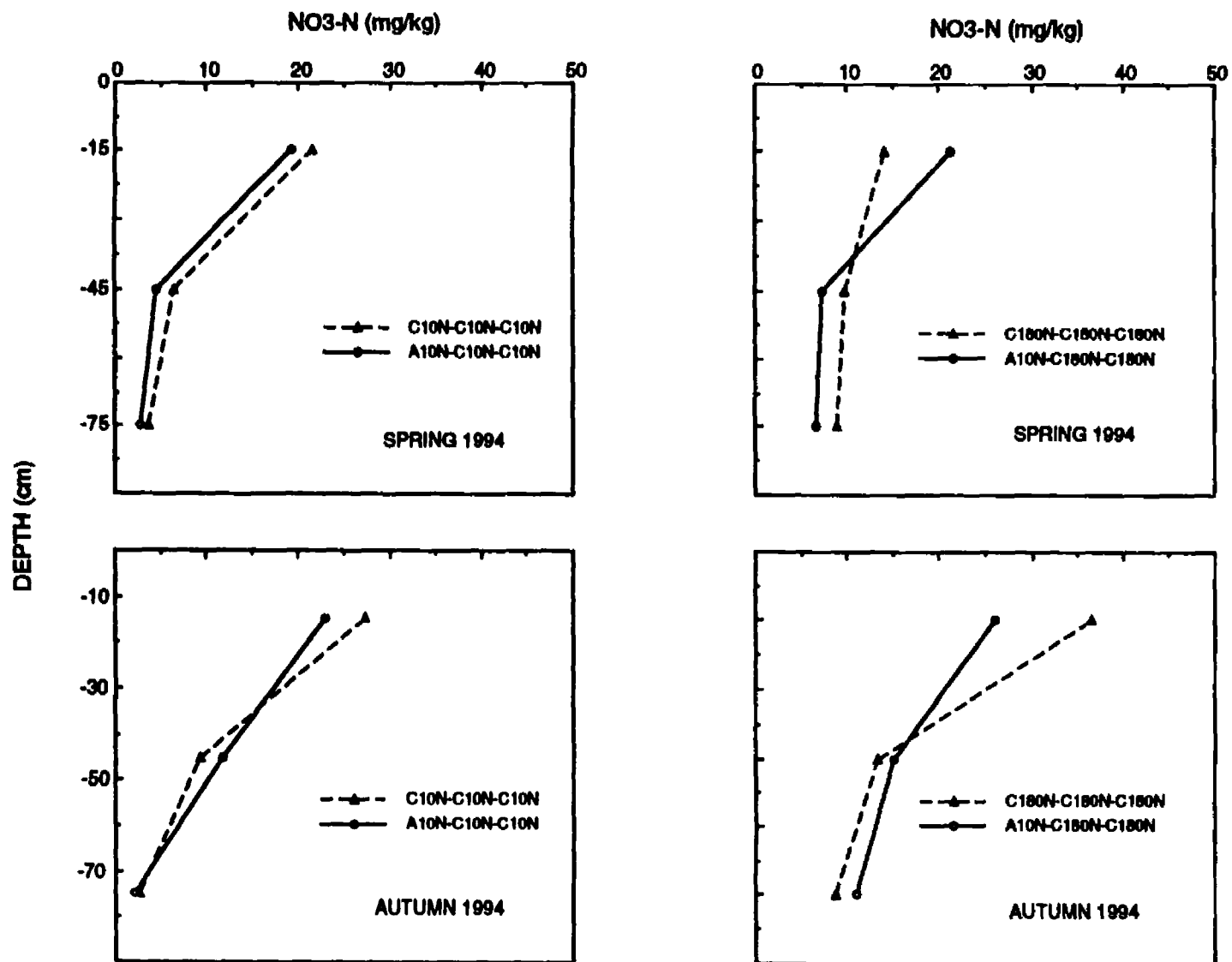


Fig. 5.5. Soil nitrate concentrations (in mg/kg) at three depths and two N rates (10 or 180 kg N/ha) on the clay soil (at Saint-Nicolas) for crop successions at early spring and at the end of the growing season in 1994. Corn was preceded by first-year alfalfa (A10N-C10N-C10N or A180N-C180N-C180N) or corn (C10N-C10N-C10N or C180N-C180N-C180N).

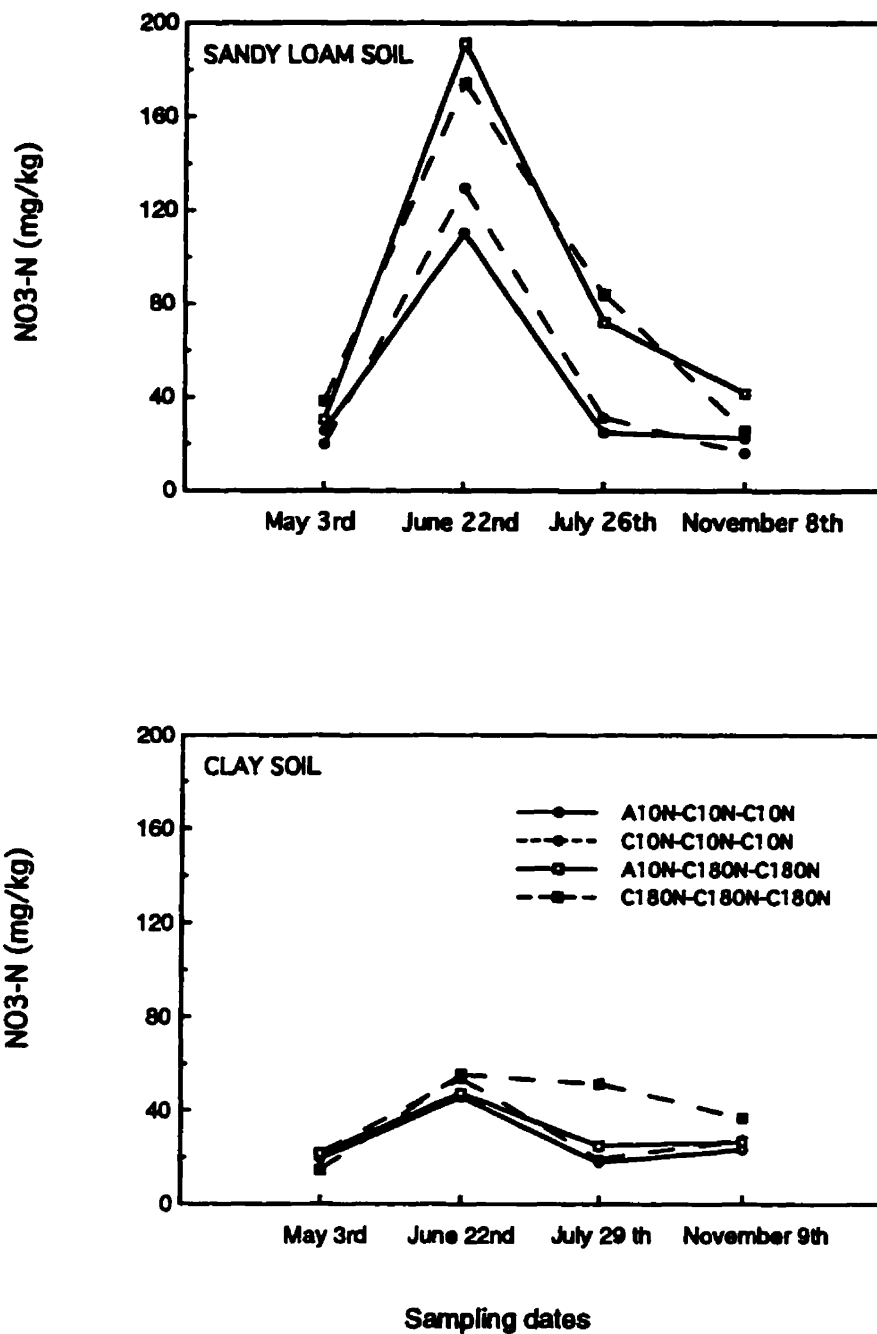


Fig. 5. 6. Variations of nitrate concentrations in the 0-30 cm soil layer in 1994 on the sandy loam soil (at Saint-Anselme) and on the clay soil (at Saint-Nicolas) at four sampling dates for corn after alfalfa fertilized with 10 or 180 kg N/ha (A10N-C10N-C10N or A10N-C180N-C180N) and continuous corn fertilized with 10 or 180 kg N/ha (C10N-C10N-C10N or C180N-C180N-C180N).

References

Allison, F. E. 1966. The fate of nitrogen applied to soils. *Adv. Agron.* 8:219-258.

Barnett, G. 1996. Historique de la fertilisation des sols au Québec. Colloque sur la fertilisation intégrée des sols. Conseil des productions Végétales du Québec 257 Pages.

Bergström, L. 1987. Nitrate leaching and drainage from annual and perennial crops in tile-drained plots and lysimeters. *Journal of Environmental Quality* 16:11-18.

Bockman, O.C., O. Kaarstad, O.H. Lie, I. Richard, 1990. Agriculture et fertilisation. Division Agriculture, Norsk Hydro a.s, Oslo, Norvège.

Bundy, L.G. and T.W. Andraski. 1993. Soil and plant nitrogen availability tests for corn following alfalfa. *J. Prod. Agric.* 6: 200-206.

Broadbent, F.E. and A.B. Carlton. 1978. Field trials with isotopically labeled nitrogen fertilizer. In D.R. Nielsen and J.G. MacDonald (ed), *Nitrogen in the environment. Volume 1. Nitrogen behavior in the field soil.* Academic Press Inc, London, UK.

Chantigny, M.H. 1995. Evolution de l'activité biologique et de la stabilité structurale du sol sous différents types de cultures et de fertilisations azotées. Thèse de Doctorat. Université Laval, Sainte-Foy, 120 pp.

Conseil des productions Végétales du Québec. 1984. Maïs, culture. Ministère de l'agriculture, des pêcheries et de l'alimentation. Agdex 111/20.

Conseil des productions Végétales du Québec. 1996. Grilles de référence en fertilization. 2e édition. Ministère de l'agriculture, des pêcheries et de l'alimentation.

Dionex. 1988. Chromatography Cookbook. Dionex Corporation.

Fischer, R.A. 1981. Optimizing the use of water and nitrogen through breeding of crops. Plant and Soil 58, 249-278.

Fox, R.H. and W.P. Piekielek. 1988. Fertilizer N equivalence of alfalfa, birdsfoot trefoil, and red clover for succeeding corn crops. J. Prod. Agric. 1:313-317.

Guillard, K., G.F. Griffin, D.W. Allinson, W.R. Yamartino, M.M. Rafey and S.W. Pietryk. 1995. Nitrogen utilization of selected cropping systems in the U.S. Northeast: II. Soil profile nitrate distribution and accumulation. Agron. J. 87:199-207.

Harris, G.H. and O.B. Hesterman. 1990. Quantifying the nitrogen contribution from alfalfa to soil and two succeeding crops using nitrogen-15. Agron.J. 82:129-134.

Isfan, D., J. Zizka, A. D'Avignon, and M Deschènes. 1995. Relationship between nitrogen rate, plant nitrogen concentration, yield and residual soil nitrate-nitrogen in silage corn. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 26:2531-2557.

Jones, R. D. et A. P. Schwab. 1993. Nitrate leaching and nitrite occurrence in a fine textured soil. Soil Sci. 155:272-282.

Kitur, B.K., M.S. Smith, R.L. Blevins and W.W. Frye. 1984. Fate of ¹⁵N-depleted ammonium nitrate applied to no-tillage and conventional tillage corn. Agron. J. 76 : 240-242.

Knox, E. et D. W. Moody. 1991. Influence of hydrology, soil properties and agricultural land use on nitrogen in groundwater. Pages 19-57 *In* D. R. Keeney, R. F. Follet et R. M. Cruse (éd) : Managing nitrogen for groundwater quality and farm profitability. SSSA, Madison, WI. USA.

Kowalenko, C.G. 1978. Nitrogen transformations and transport over 17 months in field fallow microplots using ^{15}N . Can. J. Soil Sci. 58:69-76.

LaRue, T.A. and T.G. Patterson. 1981. How much nitrogen do legume fix ? Advances in Agronomy 34:15-38.

Liang, B.C. and A.F. Mackenzie. 1994. Changes of soil nitrate-nitrogen and denitrification as affected by nitrogen fertilizer on two Québec soils. J. Environ. Qual. 23:521-525.

Liang, B.C., M. Remillard and A.F. MacKenzie. 1991. Influence of fertilizer, irrigation, and non-growing season precipitation on soil nitrate-nitrogen under corn. J. Environ. Qual. 20:123-128.

MacDonald, A. J., D. S. Powison, P. R. Poulton et D. S. Jenkinson. 1989. Unused fertiliser nitrogen in arable soils - Its contribution to nitrate leaching. J. Sci. Food Agric. 46:407-419.

Magdoff, F., W.E. Jokela, R. Fox and G. Griffin. 1990. A soil test for nitrogen availability in the northeastern United States. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 21 : 1103-1115.

McKeague, J.A. (éd.) 1978. Manual of soil sampling and methods of analysis. Prepared by Can. Soil Survey Committee. Canadian Society of Soil Science, Ottawa, ON. 250 pp.

Ministère de l'environnement du Québec (MENVIQ). 1993. Etat de l'environnement au Québec. Montréal : Guérin. 560 p.

Olsen, R.J., R. F. Hensler, O. J. Attoe, S. A. Witzel et L. A. Peterson. 1970. Mouvement of nitrate N through soil profiles. Soil Sci Soc. Amer. Proc. 34:449-452.

Paré, T. et F.-P. Chalifour. 1993. Efficacité d'utilisation de l'azote de différents systèmes culturaux céréales-légumes afin de limiter les émissions d'oxyde nitreux (N₂O). Revue bibliographique. Contrat No. ASC: 01396-2-C064/01-XSK. Ministère de l'Agriculture. 68 pages.

Roth, G. W. et R. H. Fox. 1990. Soil nitrate accumulations following nitrogen-fertilized corn in Pennsylvania. J. Environ. Qual. 19:243-248.

Schertz, D.L. and D.A. Miller. 1972. Nitrate-N accumulation in the soil profile under alfalfa. Agron. J. 64: 660-664.

Shipley, P.R., J.J. Meisinger and A.M. Decker. 1992. Conserving residual corn fertilizer nitrogen with winter cover. Agron. J. 84:869-876.

Singh, B., D. S. Rana et G. S. Sekhon. 1978. Some measures of reducing leaching loss of nitrates beyond potential rooting zone. IV Intercropping. Plant Soil 49:633-639.

Statistical Analysis System Institute, Inc. 1990. SAS user's guide : Statistics. 6 th ed., SAS Institute Inc., Cary, NC.

Steel, R.G.D. and J.H. Torrie. 1980. Principles and procedures of statistics : A biometrical approach. McGraw-Hill Publishing Co. NY.

Tabi, M., L. Tardif, D.Carrier, G Laflamme and M. Rompré. 1990. Rapport de synthèse. Entente auxiliaire Canada-Québec sur le développement agro-alimentaire. Publ. no. 90-130156, Gouvernement du Québec, Québec, PQ. 71 pp.

Timmons, D.R. and Cruse, R.M. 1991. Residual nitrogen-15 recovery by corn as influenced by tillage and fertilization method. Agron. J. 83: 357-363.

Tran, T. S. 1994. Efficacité et devenir de l'engrais azoté marqué ^{15}N appliqué à la culture de maïs (*Zea mays* L.). Thèse de Doctorat. Université Laval, Sainte-Foy, 157 pp.

Tran, T. S. 1996. Utilisation rationnelle de l'azote en agriculture. Pages 19-47 Dans, Colloque sur la fertilisation intégrée des sols, Cahier de conférences. CPVQ Inc. 257 pp.

Tsai, C.Y., D.M. Huber, D.V. Glover and H.L. Warren. 1984. Relationship of N deposition to grain yield and N response of three maize hybrids. *Crop Sci.* 24:277-281.

Wiesler, F. and W.J. Horst. 1992. Differences between maize cultivars in yield formation, nitrogen uptake and associated depletion of soil nitrate. *J. Agron. Crop Sci.* 168:226-237.

Wiesler, F. and W.J. Horst. 1993. Differences among maize cultivars in the utilization of soil nitrates and the related losses of nitrate through leaching. *Plant Soil* 151:193-203.

DISCUSSION GÉNÉRALE

DISCUSSION GÉNÉRALE

Les effets bénéfiques de l'inclusion de la luzerne dans les rotations avec le maïs ont été observées par de nombreux chercheurs (Bundy et Andraski, 1993; El-Hout et Blackmer, 1990; Fox et Piekielek, 1988). La présente étude a utilisé la luzerne non dormante cv. Nitro développée spécialement pour une production abondante de fourrage et un rendement en azote (N) élevé pendant l'année d'implantation (Pfarr, 1987; Sheaffer et al., 1989). Cette étude vient confirmer que même en région à courte saison de croissance et à climat froid et humide, la luzerne peut jouer un rôle important dans la nutrition azotée du maïs subséquent. En particulier, cette étude a mis en évidence l'existence de nombreuses interactions entre le type de sol, la dose d'N, l'hybride cultivé et le précédent cultural. Toutefois, notre étude soulève des sujets de discussion dont quelques-uns seront abordés dans ce chapitre.

La détermination de doses optimales est souvent l'un des objectifs majeurs des études de fertilisation azotée (Isfan, 1994; Tran, 1995, Paré et al., 1993). L'étude que nous avons menée indique une réponse linéaire à l'N sur le loam sableux. La dose d'N pour l'obtention du maximum de rendement devait donc se situer au delà de la dose maximale que nous avons utilisée (180 kg N ha⁻¹). L'utilisation d'une gamme plus étendue de doses d'N dont quelques-unes nettement plus élevées que 180 kg ha⁻¹ aurait permis une étude plus exhaustive des effets de l'N appliqué. Toutefois, l'une des hypothèses de départ formulait que la dose de 180 kg N ha⁻¹ recommandée pour des hybrides plus tardifs devrait être plus élevée que celle des hybrides plus précoces utilisés dans cette étude. L'utilisation de doses d'N plus élevées ne se justifiant donc pas a priori. Des études menées au Québec ont aussi rapporté des doses d'N optimales inférieures à 180 kg ha⁻¹ pour la production du maïs (Isfan, 1994; Tran, 1995, Paré et al., 1993).

D'autres études menées au Québec ont démontré que des doses d'N plus élevées ne permettent souvent d'accroître le rendement du maïs que de façon minimale (Isfan, 1995; Paré et al., 1993). Au delà d'une certaine dose, l'N n'est plus le facteur limitant. Gardner et al. (1990) ont recommandé beaucoup de prudence dans la recommandation de fertilisation azotée du maïs dans les régions à la limite de l'adaptation de cette espèce. Non seulement il existe des limitations dues au climat, mais le potentiel de rendement des hybrides précoces utilisés est bas. Ces facteurs militent en faveur de l'utilisation de faibles doses d'N.

La réponse linéaire à l'N suggère que dans les régions à climat froid à la limite de l'adaptation du maïs, un calcul économique et une évaluation de l'impact environnemental de l'azote appliqué devraient être déterminants dans les choix de niveaux de fertilisation, en monoculture de maïs ou en rotation avec des légumineuses. Puisque le potentiel de rendement est limité par d'autres facteurs, l'efficacité d'utilisation de l'N (EUN) appliqué devrait alors prendre toute son importance dans la formulation des recommandations de fertilisation azotée. L'EUN intervient dans la méthode du bilan prévisionnel (Giroux et Tran, 1989). Avec 400 kg N ha⁻¹, Liang et Mackenzie (1994) ont obtenu des rendements en grain (avec 15% d'humidité) de 4,8 à 11,9 Mg ha⁻¹ dans une région accumulant plus de 3000 UTM au Québec. Cependant, les besoins en UTM des hybrides utilisés n'étaient pas indiqués. Avec 120 kg N ha⁻¹ nous avons obtenu des rendements (lorsque ajustés à 15% d'humidité) de l'ordre de 6,0 à 6,8 kg ha⁻¹. Avec 180 kg N ha⁻¹, les rendements étaient de l'ordre de 6,4 à 7,4 kg N ha⁻¹. A la dose de 120 kg N ha⁻¹, l'efficacité d'utilisation de l'N a été plus élevée. L'application de 120 kg N ha⁻¹ pourrait être considérée comme base de fertilisation pour les hybrides de 2300 UTM. Cette base pourrait alors être ajustée pour tenir compte de l'objectif de rendement (besoins en N) et des apports d'N au sol (N minéral au printemps, N minéralisé et N du précédent cultural).

La méthode du bilan prévisionnel d'N est utilisée au Québec pour la détermination des doses d'N à appliquer aux céréales (Giroux et Tran, 1989). Cette méthode consiste à prendre en compte les besoins en N des cultures et des différentes sources d'N à la disposition de la plante. Entre autres, la méthode du bilan prévisionnel en N requiert l'estimation de différents pools d'N disponibles à la plante. La détermination des pourcentages et quantités d'N dérivés du fertilisant azoté et de ceux provenant des résidus de luzerne ou d'N conservé dans le sol par la légumineuse revêt ici toute son importance. Elle contribue à une meilleure connaissance de l'implication des différents pools à la nutrition azotée du maïs en monoculture ou en rotation. Elle fournit également une information plus précise quant aux coefficients d'utilisation de l'N en fonction des doses appliquées dans les systèmes de culture étudiés; ce dont ne tient pas compte le coefficient d'utilisation moyen de l'N de 50 % utilisé dans les calculs (Tran, 1996). La précision des recommandations de fertilisation azotée par la méthode du bilan prévisionnel peut donc être améliorée par l'utilisation de meilleurs estimés de coefficients d'utilisation de l'N.

Cette étude a démontré que l'inclusion de la luzerne en tête de rotation avec le maïs contribue à l'augmentation du rendement et à la nutrition azotée du maïs subséquent. L'impact de la luzerne a surtout été dû à l'augmentation des teneurs en N du sol au printemps suivant l'année d'implantation. De telles augmentations de teneurs en N disponible du sol ont été observées par de nombreux chercheurs dont Bundy et Andraski (1993) et Le-Hout et Blackmer (1990). L'abondance d'N dans le sol au printemps se traduit très souvent par une faible réponse à l'engrais azoté (Bundy et Malone, 1988; Fox et Piekielek, 1988).

L'augmentation des teneurs printanières d'N du sol après une culture de luzerne a été à la base du développement d'un outil diagnostique, le test de teneur en nitrates du sol. Ce dernier utilise une teneur seuil au delà de laquelle le maïs subséquent ne répondrait plus à l'N du fertilisant (Magdoff et al., 1990; Bundy et Andraski, 1993). L'utilisation d'un

test semblable dans notre milieu d'étude ne garantit cependant pas une amélioration des recommandations d'N. En effet, l'abondance d'N dans le profil cultural en début de saison de croissance après la luzerne n'a pas procuré les rendements les plus élevés sans application d'engrais azoté. Une fertilisation minérale d'appoint semble donc nécessaire dans la rotation. Tran (1996) rapporte des circonstances où le test de nitrates avait sous-estimé la capacité du sol à fournir de l'N au sol avec précédent d'engrais vert. Dans notre cas, c'est d'une surestimation de la capacité du sol à fournir l'N au maïs subséquent dont il aurait été question.

Les études de rotation arrivent à différencier les effets de rotation liés à l'N de ceux qui dépendent d'autres facteurs. Dans la présente étude, les effets de rotation non liés à l'azote n'ont pas été très importants. Baldock et al. (1981) ont identifié les effets de rotation non liés à l'azote comme ceux étant responsables de la différence de rendement entre une non légumineuse en monoculture et la même espèce subséquente à une légumineuse, à la dose la plus élevée d'azote. Paré (1992) a étendu cette notion aux doses intermédiaires (50 et 100 kg ha⁻¹) chaque fois que le rendement de la non légumineuse dans la rotation est supérieur à celui dans la monoculture.

L'utilisation de la notion d'effets de rotation non liés à l'N suggère l'existence de plusieurs maxima de rendement pour un hybride donné en fonction des conditions de culture. Lory et al. (1995) ont proposé que la réponse à un précédent de légumineuse peut prendre deux aspects principaux : soit la légumineuse modifie le maximum de rendement et des effets de rotation non liés à l'N interviennent ou alors, le rendement maximal reste le même mais il est très vite atteint avec une dose moins élevée d'N. Dans ce dernier cas, les différences de rendement entre la monoculture et le rendement sont principalement dues à l'N que la légumineuse introduit dans le système (Black, 1993). Les résultats de notre étude semblent s'inscrire dans le second cas. En effet, une seule année de luzerne n'a probablement pas modifié les facteurs qui pourraient améliorer la structure du sol, diminuer les mauvaises herbes, etc. Le type de réponse

que nous avons obtenu a invalidé l'approche d'estimation des VRFA par la méthode de calcul par différence telle que décrite par Lory et al. (1995), méthode plus apte à révéler les effets de rotation non liés à l'N.

La plupart des chercheurs ont estimé les VRFA en se basant uniquement sur les rendements en matière sèche de la culture de non-légumineuse (Hesterman et al. 1987; Fox et Piekielek). Paré (1992) a proposé qu'on les obtienne aussi sur la base du prélèvement d'N. Ils tiendraient alors compte à la fois de la concentration en N des tissus et de l'impact réel de la légumineuse comme précédent cultural sur la nutrition azotée de la culture subséquente de non légumineuse. Les VRFA sur la base du prélèvement diffèrent souvent des VRFA basées sur le rendement en matière sèche (Paré et al., 1993). Dans notre étude, les VRFA ont été moins élevées sur la base du prélèvement d'N.

Une des limites des VRFA est qu'elles ne distinguent pas les effets de rotation liés ou non à l'N tels que définis par Baldock et al., (1981). Ainsi, les VRFA incluent parfois un effet non lié à l'N. Si l'on attribue à l'N tout l'impact d'un précédent de légumineuses lorsqu'il existe des effets de rotation non liés à l'N, il est probable qu'on sous estime la quantité réelle de fertilisant azoté à introduire le cas échéant dans le système. Paré (1992) observe aussi que les VRFA d'une légumineuse peuvent être nulles ou inférieures à 0 kg N ha⁻¹ mais des effets de rotation peuvent se manifester. Par conséquent, il ne faudrait pas formuler de recommandations pour l'application d'N en utilisant uniquement des VRFA. Les travaux utilisant l'N marqué permettent de quantifier avec plus de précision les contributions de chaque source d'N au rendement.

La méthode isotopique que nous avons utilisée indique une contribution en N de la luzerne au maïs comparable aux VRFA ($N_{dfrc} \approx VRFA \times EUN$). Bien qu'elles incluent les effets de rotation non liés à l'N et que leur méthode de calcul suppose que la minéralisation, l'immobilisation et les autres transformations de l'N dans le système sont

similaires avec ou sans apport d'N, les VRFA peuvent être utilisées lorsque les ressources disponibles ne permettent pas l'utilisation de traceurs isotopiques. Varvel et Peterson (1990) ont observé que les deux méthodes peuvent conduire à des interprétations valides, lorsque les données concernant les facteurs culturaux et telluriques sont bien exploitées.

Les résultats de cette étude suggèrent une contribution minimale des effets de rotation non liés à l'N. L'existence de ces derniers avait même été mise en doute par Crookston et al. (1988; 1991). Ils qualifiaient alors ces effets de phénomènes inconstants et insaisissables. Ils invoquaient qu'une culture de non légumineuse alternante pouvait en apparence diminuer l'effet négatif d'une monoculture, sans contribuer de façon positive au rendement de la culture subséquente. Mais les mécanismes en cause n'ont pas été identifiés. L'utilisation du soja dans leur étude pouvait justifier une telle observation dans la mesure où le soja peut au contraire épuiser les réserves d'N du sol (Paré et al., 1992). Dans notre étude, l'apport d'N par la luzerne a été démontré, ce que n'aurait pas fait une non légumineuse alternante. Toutefois, une non légumineuse moins exigeante que le maïs pourrait avoir un effet similaire. Le fait d'avoir utilisé une seule année de luzerne dans l'étude pourrait expliquer l'impact relativement peu important des effets de rotations non liés à l'N.

La performance des hybrides utilisés dans cette étude a reflété leur adaptation au milieu. Les hybrides les plus précoces à savoir Northrup King 0565 (2300 CHU) et Pioneer 3979 (2325 CHU) ont eu des rendements plus élevés, des teneurs en eau du grain plus basses à la récolte et une efficacité d'utilisation de l'N par le grain plus grande que l'hybride plus tardif Pioneer 3962 (2500 CHU). Il s'agit là de différences d'ordre adaptatif. Gardner et al. (1990) ont aussi mentionné que la réponse des hybrides aux techniques culturales est fortement influencée par leur adaptation au milieu.

Toutefois, les différences entre les hybrides Northrup King 0565 et Pioneer 3979 notamment pour les teneurs en eau du grain à la récolte et l'efficacité d'utilisation de l'N

ne seraient pas d'ordre adaptatif. Elles seraient plutôt dues à des différences physiologiques et phénologiques puisque leurs besoins en unités thermiques sont similaires. Les différences de teneur en eau à la récolte ont été liées à la précocité de la sénescence des spathes (Sweeney et al., 1994), aux caractéristiques de l'endosperme et à l'épaisseur du péricarpe du grain (Troyer et Ambrose, 1971). Les différences entre les durées relatives de la phase végétative et celle de remplissage du grain telles que caractérisées par Corke et Kannenberg (1989) pourraient aussi être évoquées. Dans notre étude, la montaison a été plus précoce chez l'hybride Northrup King 0565 par rapport à l'hybride Pioneer 3979. L'hybride Northrup King 0565 aurait eu plus de temps pour sécher. La période végétative plus longue de l'hybride Pioneer 3979 le prédisposait à un rendement et grain plus élevé.

L'efficacité d'utilisation de l'N par le grain a été en général plus élevée pour les hybrides les plus hâtifs (Northrup King 0565 et Pioneer 3979) et en particulier, pour la proportion de l'N absorbé transférée au grain (efficacité physiologique, indice de récolte pour l'N). L'hybride Pioneer 3979 a cependant eu une efficacité de récupération de l'azote appliqué plutôt faible aux doses élevées d'N. L'utilisation de doses d'N élevées pour cet hybride présente des risques environnementaux importants en plus de constituer une perte économique pour les producteurs. Les différences d'efficacité de récupération de l'N appliqué ont été liées à la densité racinaire (Bock, 1984). Le choix de l'hybride peut donc s'appuyer sur plusieurs considérations. Les hybrides sont d'abord choisis en fonction de leur capacité d'adaptation (besoins en UTM) et de leur potentiel de rendement. En plus, ils pourraient être sélectionnés en fonction de leur efficacité d'utilisation de l'N disponible.

L'hybride plus tardif Pioneer 3962 avait un potentiel de rendement plus élevé comme l'indique son rendement lors d'une année favorable. Le choix de cet hybride à la limite de l'adaptation pour la région accumulant moins de 2500 UTM présente un risque élevé pour le rendement et la qualité du grain récolté. Le système de degrés-jours de

croissance prévoit qu'un hybride ne devrait être utilisé que si le nombre de degrés-jours de croissance du milieu est supérieur de 200 à celui requis par l'hybride (Gardner et al. 1990). Dans la province des Maritimes, la recommandation pour le maïs ensilage est supérieure de 200 CHU à celle du maïs grain (Bootsma et al. 1979). En Alberta, il est recommandé que pour le maïs fourrage, les besoins en UTM peuvent être de 200 CHU supérieurs à ceux de la localité maïs, ceux du maïs-grain doivent être de 200 CHU inférieurs. Des seuils critiques semblables seraient aussi utiles pour les principales régions de production de maïs du Québec.

Les indices de récolte calculés dans cette étude ont permis d'apprécier la répartition de la matière sèche faite entre le grain et les cannes (Chapitre II), de l'azote disponible (Chapitre III) et de l'N du fertilisant ou encore, de l'N issu des résidus de luzerne ou conservé dans le sol par la luzerne (Chapitre IV). Le facteur le plus marquant sur les indices de récolte a été l'hybride. Les hybrides les plus précoces ont réparti leur matière sèche et l'N prélevé en faveur du grain. Cette répartition de la matière sèche et de l'N en faveur du grain explique les différences d'efficacité d'utilisation de l'N entre hybrides. DeLoughery et Crookston (1989) ont aussi observé que l'indice de récolte est lié à la précocité de l'hybride. Ils ont observé des indices de récolte plus élevés chez les hybrides les plus précoces dans des conditions favorables ou non favorables d'environnement. Par contre, Dwyer et al. (1991) ont observé que les hybrides hâtifs de maïs tendaient à avoir des indices de récolte plus faibles que les hybrides plus tardifs. Toutefois, leur étude fut conduite dans un environnement accumulant plus de 2800 UTM où les hybrides hâtifs sont défavorisés à cause de leur potentiel de rendement bas.

La luzerne non dormante cv. Nitro a eu un impact marqué sur l'N du sol l'année suivant sa culture maïs très peu subséquemment. Cette observation suggère que deux années après la culture de la luzerne, aucun crédit d'N ne devrait être recommandé pour la culture du maïs subséquent. De plus, pendant l'année suivant sa culture, un manque apparent de synchronisme semble exister entre l'abondance d'N provenant des résidus

de luzerne en début de saison de croissance et la période exponentielle de prélèvement d'N par le maïs. Cette période se situerait entre juillet et août. L'azote issu des résidus de la luzerne subirait en bonne partie le lessivage et la dénitrification en début de saison de croissance, lorsque les pluies sont abondantes et le prélèvement d'N par le maïs est faible. Fischer (1981) a proposé l'utilisation d'hybrides de maïs ayant un prélèvement d'N élevé en début de saison de croissance afin de limiter les risques de contamination de l'environnement par les nitrates.

Dans cette étude, les effets de la luzerne et de la fertilisation azotée sur la production du maïs ont été plus favorables et importants à Saint-Anselme (sur loam sableux) par rapport à Saint-Nicolas (sur sol argileux). Bien que la variance des termes d'erreur n'ait pas permis de comparaison statistique entre ces deux sites, il serait utile, en dernière analyse, de spéculer sur les causes probables de ces différences. La texture du sol a pu influencer la minéralisation de l'N du sol. Simard et N'Dayegamiye (1993) ont observé que le potentiel de minéralisation de l'N est affecté par la teneur en argile du sol. Les teneurs en N du sol sableux étaient plus élevées au début de l'expérience, ce qui aurait limité l'impact du fertilisant azoté et de l'N issu des résidus de luzerne. Les semis étaient d'abord effectués à Saint-Anselme et ensuite à Saint-Nicolas sur le sol argileux. La différence entre les dates de semis aux deux sites a atteint 8 jours en 1992 et 1993. En région à courte saison de croissance, de telles différences peuvent se traduire par des écarts de croissance importants. L'engorgement en eau du sol argileux en début de saison de croissance a aussi ralenti la croissance du maïs sur ce site. L'implantation de la luzerne a été plus satisfaisante sur le loam sableux par rapport au sol argileux et l'importance de l'N apporté au sol aurait suivi cette tendance. La dénitrification plus élevée (Chantigny, 1995) et la protection physique de l'N organique dans les agrégats du sol argileux auraient aussi contribué à limiter l'impact de la fertilisation azotée et du précédent de luzerne à Saint-Nicolas. Les caractéristiques des sites et les conditions de culture ont été déterminantes pour la performance du maïs.

Les résultats de cette étude suggèrent des travaux de recherche complémentaires. En particulier, l'estimation des quantités d'N introduites dans le profil cultural par les racines et les collets de luzerne permettrait de mieux apprécier les effets dus à l'N de ceux non liés à l'N. De plus, une étude de la minéralisation des résidus de luzerne fournirait une meilleure appréciation des quantités d'N et de leur vitesse de libération dans le milieu.

L'objectif à la ferme peut être de maximiser le rendement en fourrage ou alors, la quantité d'N à retourner dans le sol. Des études devraient être effectuées afin de permettre des recommandations de modes de gestion des récoltes de la luzerne selon l'objectif visé (fourrage vs accroissement des teneurs en N minéral du sol). Il serait également opportun de mieux préciser l'évolution des besoins du maïs en azote et de déterminer pour la région, les périodes pendant lesquelles le maïs peut tirer le meilleur profit de l'N issu des résidus d'un précédent de légumineuse.

Un système de culture ne saurait être recommandé que si sa viabilité économique est prouvée. Dans ce sens, une évaluation économique de l'impact de la luzerne cultivée comme plante annuelle en tête de rotation avec le maïs est indispensable.

CONCLUSION GÉNÉRALE

La culture du maïs occupe une place très importante dans l'agriculture du Québec et le développement d'hybrides de maïs hâtifs renforcera cette tendance dans les zones où s'accumulent entre 2300 et 2500 UTM. Il est donc important de rechercher des solutions aux problèmes que pose la production intensive du maïs et notamment, aux problèmes liés à sa monoculture, à ses besoins en azote (N) élevés et à la contamination des cours d'eau et des nappes phréatiques par les nitrates.

Les objectifs de cette étude étaient la détermination des effets de l'inclusion d'une luzerne annuelle et de la fertilisation azotée sur le rendement et la nutrition azotée d'hybrides de maïs de précocité différente, la caractérisation du potentiel de fixation d' N_2 de la luzerne Nitro dans l'Est du Québec et la détermination de l'impact de la monoculture de maïs et de la luzerne comme tête de rotation sur l'N soluble du sol. Nos hypothèses ont été vérifiées et nous avons atteint nos objectifs. Nos résultats nous permettent de conclure que :

1. La luzerne non dormante cv. Nitro peut être avantageuse dans les conditions climatiques du Québec où la survie à l'hiver de cette espèce est souvent compromise. Elle produirait en moyenne un rendement de 2,8 à 3,8 Mg ha⁻¹ pendant l'année d'implantation avec une régie de deux récoltes selon le site. Les rendements de la luzerne Nitro ont été plus élevés que la moyenne au Québec pour l'année d'implantation sur le loam sableux mais moins élevés sur le sol argileux.

2. La luzerne cv. Nitro peut fixer des quantités appréciables d'N. Entre 55 et 76 kg ha⁻¹ de l'N du fourrage de la luzerne cv. Nitro soit environ 60 % du total provenait de l'atmosphère. Les valeurs de remplacement en fertilisant azoté de la luzerne en 1993 ont été de 78 à 106 kg ha⁻¹ sur le loam sableux et de 28 à 59 kg N ha⁻¹ sur le sol

argileux. Cela suggère que le crédit azoté d'un précédent de luzerne devrait être ajusté en fonction de la qualité de la couverture végétale et de la texture du sol. La seconde culture de maïs a reçu très peu d'N de la luzerne de première année.

3. L'utilisation de la luzerne en tête de rotation augmente significativement le rendement du maïs-grain subséquent. En effet, les rendements ont été plus faibles en monoculture de maïs par rapport à la rotation. Toutefois, les différences observées ont varié selon le site, la dose d'N et l'hybride de maïs. L'humidité du grain à la récolte a été plus faible et les rendements en grain plus élevés pour les hybrides les plus adaptés (Northrup King 0565 et Pioneer 3979). Le loam sableux de la série Rivière-du-Loup (Saint-Anselme) a été plus favorable à la production du maïs grain que le sol argileux de la série Kamouraska (Saint-Nicolas). Les différences marquées entre les sites militent en faveur de la gestion de la fertilisation azotée selon la texture du sol.

4. Le précédent de luzerne a contribué à la nutrition azotée du maïs-grain subséquent. L'N issu des résidus de luzerne est une alternative intéressante à l'utilisation abondante d'N inorganique. L'apport d'N par la luzerne au maïs a été confirmé par des teneurs plus élevées en N dans le grain et les cannes après la culture de luzerne et par rapport au maïs en monoculture. Toutefois, il reste à démontrer la supériorité de la luzerne Nitro sur les autres cultivars de luzerne utilisés dans la province.

5. L'utilisation de la luzerne Nitro comme tête de rotation pour le maïs s'est traduite par une diminution de l'efficacité d'utilisation de l'N du fertilisant et une baisse des proportions et des quantités d'N dérivant du fertilisant azoté. Par contre, on assistait à une augmentation concomitante de l'N dérivé des résidus de luzerne ou de l'N conservé dans le sol. Les doses élevées d'N appliquées au maïs après la luzerne limitent la valorisation de l'N fixé et introduit dans le système par la légumineuse.

6. Les teneurs en N des grains et des cannes ont augmenté avec les doses d'N. L'absorption d'N suivait une courbe linéaire sur le loam sableux et une courbe quadratique sur le sol argileux. Ce dernier site a permis d'observer que la dose d'N

optimale pour la production de maïs en monoculture est plus élevée que celle du maïs en rotation. La réponse linéaire à l'N sur le loam sableux, même avec précédent de luzerne suggère que des doses d'N plus importantes sont nécessaires pour l'obtention du maximum de rendement.

7. Le maïs-grain hâtif peut être produit avec satisfaction avec 120 kg N ha^{-1} dans les régions accumulant moins de 2500 UTM. La dose optimale la plus élevée obtenue avec le modèle quadratique plateau sur les rendements en grain était de 122 kg N ha^{-1} . Des quantités d'N dérivées du fertilisant N étaient plus importantes à la dose de 180 kg N ha^{-1} mais, l'efficacité d'utilisation de l'N était plus élevée avec 120 kg N ha^{-1} . De plus, malgré des rendements plus élevés, des quantités importantes d'N n'étaient pas récupérées (jusqu'à 69 % en 1993) par le maïs lorsque 180 kg N ha^{-1} étaient utilisés.

8. Les hybrides de maïs hâtifs étaient différents dans l'utilisation de l'N du sol, ce qui suggère que le niveau de fertilisation azotée devrait tenir compte de la capacité de prélèvement de l'N du sol de l'hybride utilisé. L'hybride Pioneer 3979 était l'un des mieux adaptés, en raison de ses besoins en UTM relativement peu élevés, toutefois, sa capacité d'utilisation de l'N du sol aux concentrations élevées était plutôt faible par rapport à celle des deux autres hybrides.

9. La répartition de la matière sèche entre le grain et les cannes a été affectée par la fertilisation azotée, les différences entre hybrides et les successions culturales. La répartition de l'N prélevé entre le grain et les cannes a surtout été influencée par l'hybride. La répartition de la matière sèche et de l'N s'est effectuée en faveur du grain chez les hybrides les plus précoces, d'où leurs rendement plus élevés et leur meilleure efficacité d'utilisation de l'N.

10. La culture de luzerne a augmenté les teneurs en N du sol au début du printemps suivant. Les valeurs obtenues étaient en accord avec les crédits d'N recommandés par

le CPVQ pour l'enfouissement des racines et collets de luzerne. Toutefois, les teneurs du sol en N élevées au début du printemps ne contribuent pas nécessairement à la nutrition du maïs dont les besoins à cette période de la saison sont plutôt faibles. Il reste à déterminer l'impact des résidus de la luzerne par rapport à ceux du maïs sur les fractions labiles de la matière organique tellurique et la minéralisation de l'N du sol.

11. Les effets de la luzerne comme tête de rotation pour le maïs ont surtout été importants en 1993 (année suivant directement la culture de la luzerne), par rapport à 1994. Malgré l'absence d'un synchronisme parfait entre l'apport d'N par le précédent de luzerne au début du printemps et la période mi-estivale où les besoins en N du maïs sont élevés, l'utilisation de la luzerne en rotation avec le maïs apparaît, somme toute, comme une alternative intéressante étant donné les problèmes de dégradation des sols liés à la monoculture de maïs et considérant sa contribution au rendement et à la nutrition azotée du maïs subséquent dans la rotation.

BIBLIOGRAPHIE

Angers, D.A. et G.R. Mehuys. 1988. Effects of cropping on macro-aggregation of a marine clay soil. Can. J. Soil Sci. 68 : 723 - 732.

Barber, S.A. 1984. Soil nutrient bioavailability : a mechanistic approach. Wiley. NY.

Barnes, D.K., D.K., G.H. Heichel, C.C. Sheaffer et G.C. Marten. 1985. Maximizing forage and N yield of seeding year alfalfa-genotypes and fall dormancy effects . Page 54. Agron. Abstracts. ASA, Madison, WI.

Barnett, G. 1996. Historique de la fertilisation des sols au Québec. Pages 7-18, Dans, Colloque sur la fertilisation intégrée des sols, cahier de conférences. Conseil des Productions Végétales du Québec 257 p.

Bationo, A. 1979. Effets de N, P et K sur le rendement du maïs-grain, modèles mathématiques et études économiques, stratification des analyses de sol. Thèse de Maîtrise, Faculté des Sciences de l'Agriculture et de l'Alimentation, Université Laval, N° 5051.

Bedekovic P. 1987. L'excès de nitrates dans les eaux : Problèmes et perspectives techniques. Perspectives Agricoles 115: 184-189.

Bélangier, F. 1996. Engrais et amendements organiques. Pages 161-176, Dans Colloque sur la fertilisation intégrée des sols, cahier de conférences. Conseil des Productions Végétales du Québec 257 p.

Bergersen. F.J. 1980. Methods for evaluating biological nitrogen fixation. Wiley,

Chichester.

Bergström, L. 1987. Nitrate leaching and drainage from annual and perennial crops in tile-drained plots and lysimeters. *J. Environ. Qual.* 16:11-18.

Binford, G.D., A.M. Blackmer et M.E. Cerrato. 1992. Nitrogen concentration of young corn plants as an indicator of nitrogen availability. *Agron. J.* 84 : 219-223.

Black, C.A. 1993. Residual effects. p. 519-565. *In Soil fertility evaluation and control.* Lewis Publ., Boca Raton, FL.

Bock, B. R. et G. W. Hergert. 1991. Fertilizer nitrogen management. Pages 139-164 *dans* D. R. Keeney, R. F. Follet et R. M. Cruse (éd) : *Managing nitrogen for groundwater quality and farm profitability.* SSSA, Madison, WI. USA.

Bockman O. C., O. Kaarstad, O.H. Lie, I. Richard, 1990. *Agriculture et fertilisation.* Division Agriculture, Norsk Hydro a.s, Oslo, Norvège.

Bremner, E. et Van Kessel, C. 1992. Plant-available nitrogen from lentil and wheat residues during a subsequent growing season. *soil Sci. Soc. Am. J.* 56 : 1155-1160.

Brophy, L.S., G.H. Heichel et M.P. Russelle. 1987. Nitrogen transfer from forage legumes to grass in a systematic planting design. *Crop Sci.* 27 : 753-758.

Brown, D.M. 1986. Corn yield response to irrigation, plant population and nitrogen in a cool humid climate. *Can. J. Plant Sci.* 66 : 453-464.

Bruce, R. P., S. R. Wilkinson et G. W. Langdale. 1987. Legumes effets on soil erosion and productivity. Pages 127-136 *dans* J.F. POWER (éd) : *The role of legumes in conservation tillage systems.* Soil Cons. Soc. Am.

Bruuslema, T.W. et B.R. Christie. 1987. Nitrogen contribution to succeeding corn from alfalfa and red clover. Agron. J. 79:96-100.

Bullock, D.G. 1992. Crop rotation. Critical reviews in plant sciences 11(4) : 309-326.

Cambardella, C.A. et E.T. Elliot. 1992. Particulate organic matter across a grassland cultivation sequence. Soil Sci. Soc. Am. J. 56 : 777 - 783.

Cerrato, M.E. and A.M. Blackmer. 1990. Comparisons of models for describing corn yield response to nitrogen fertilizer. Agron. J. 82 : 138-143.

Cescas, M.P. 1971. La planification des recherches en calibration pour la recommandation des engrais chimiques au Québec. Agriculture 28: 16-22.

Chalifour, F.P. 1982. Activité saisonnière de la nitrate réductase en fonction du temps d'application de l'N d'appoint chez des hybrides de maïs de maturité différente et relation avec le rendement en plante entière, en grain et en protéines. Thèse de maîtrise, Université Laval, Sainte-Foy, Québec. 141 pages.

Chalk, P. M., C. J. Smith, S. D. Hamilton et P. Hopmans. 1993. Characterisation of the N benefit of a grain legume (*Lupinus angustifolius* L.) to a cereal (*Hordeum vulgare* L.) by an in situ ¹⁵N isotope dilution technique. Biol. Fertil. Soils 15:39-44.

Chamberland, E. 1975. La fumure azotée du maïs en relation avec l'espacement des rangs. Can. J. Plant Sci. 56: 257-269.

Chartrand, C. et R. Bolduc. 1995. Utilisations actuelles et potentielles du maïs-grain au Québec. Pages 17-40. Compte rendu de conférences, Colloque sur le maïs-grain. Conseil des Productions Végétales du Québec 227 p.

Chen, J.S, and A.F. MacKenzie. 1993. Effects of rates and placement methods of urea and potassium chloride on soil nitrogen and potassium and corn dry matter yield. Can. J. Soil Sci. 73 : 147-155.

Cox, W.J. et H.M. Reisenauer. 1973. Growth and ion uptake by wheat supplied nitrogen as nitrate, ammonium, or both. Plant Soil 38:363-380.

Conseil des Productions Végétales du Québec (CPVQ). 1994. Grilles de fertilisation. Ministère de l'Agriculture, des pêcheries et de l'alimentation, Québec.

Deckard, E. L., C.Y. Tsai et T. C. Tucker. 1984. Effect of nitrogen nutrition on quality of agronomic crops. pp. 601-615, dans : Nitrogen in crop production. ASA-CSSA-SSSA. Madison. WI. USA.

Decker, A.M., A.J. Clark, J.J. Meisinger, F. R. Mulford et M.S. McIntosh. 1994. Legume cover crop contributions to no-tillage corn production. Agron. J. 86 : 126-135.

Dionne, J.L., G. Barnett, E. Chamberland, J. Guibault, A.F. Mackenzie, R. Ouellette et M.P. Cescas. 1977. Calibration des méthodes d'analyses de sols, réponse du maïs aux engrais NPK, bilan P et K. Rapport de l'atelier calibration des méthodes d'analyses de sols. Conseil des productions végétales du Québec.

DeLoughery, R.L. and R.K. Crookston. 1979. Harvest index of corn affected by population density, maturity rating, and environment. Agron. J. 71: 577-580.

Duxbury, J.M., L.A. Harper et A.R. Mosier. 1993. Contributions of agroecosystems to global climate change. Pages 1 - 18 dans L.A. et al. (Éd), Agricultural ecosystems effects on trace gases and global climate change. ASA Spec. Publ. no. 5 ASA-CSSA-SSSA, Madison, WI.

Dwyer, L.M., R.I. Hamilton, H.N. Hayhoe and W. Royds. 1991. Analysis of biological traits contributing to grain yield of short-to mid-season corn (*Zea mays* L.) hybrids. *Can J. Plant Sci.* 71: 535-541.

Eaglesham, A.R.J, A. Ayanaba, V. Ranga Rao and D.L. Eskew. 1981. Improving the nitrogen nutrition of maize by intercropping with cowpea. *Soil Biol. Biochem.* 13:169-171.

Ellert, B.H. et J.R. Bettany. 1988. Comparison of kinetic models for describing net sulphur and nitrogen mineralization. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52 : 1692-1702.

Epstein, E. 1972. *Mineral nutrition of plants: Principles and Perspectives.* Wiley, NY.

Fageria, N.K., V.C. Baligar, C.A. Jones. 1991. Corn. Pages 205-230 dans, *Growth and mineral nutrition of field crops.* Marcel Dekker, Inc. New York.

FAO. 1995. *Annuaire d'engrais 1994.* Collection FAO : Statistiques n° 126. FAO, Rome.

Filion, P. 1996. Portrait de la production québécoise de maïs. Pages 9-15 Dans, *Compte rendu de conférences, Colloque sur le maïs-grain.* Conseil des Productions Végétales du Québec 227 p.

Freire, J.R.J. 1984. Important limiting factors in soil for the *Rhizobium*-legume symbiosis. Pages 51 - 74 dans, M. Alexander (Éd), *Biological nitrogen fixation.* Plenum Press. NY.
Gamboa, 1978. *La fertilisation du maïs.* Bulletin n°5. Institut International de la Potasse. 72p.

Goodwin, T. W. and E. I. Mercer. 1986. *Introduction to plant biochemistry.* 2nd Ed. Pergamon Press. New York.

Goyal, S. S. et R. C. Huffaker. 1984. Nitrogen toxicity in plants. Pages 97-118 *dans* : Nitrogen in crop production. ASA-CSSA-SSSA. Madison. WI. USA.

Grimard, Y. 1990. Qualité générale de l'eau au québec. Pages 23-38 *dans* : Colloque sur la conservation de l'eau en milieu agricole. CPVQ, Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation, Gouvernement du Québec.

Guiraud, G. 1987. Apports du traçage isotopique à la connaissance d'N dans les systèmes sol-plante. Perspectives Agricoles. 115: 25-32.

Hageman, R.H. 1984. Ammonium versus nitrate nutrition of higher plants. Pages 67-85 Dans, Nitrogen in crop production. ASA-CSSA-SSSA. Madison, USA.

Hamel, C., V. Furlan and D.L. Smith. 1991. N₂-fixation and transfer in a field grown mycorrhizal corn and soybean intercrop. Plant and Soil 133 : 177-185.

Hamel, C et D.L. Smith. 1991. Interspecific N-transfer and plant development in a mycorrhizal field-grown mixture. Soil Biol. Biochem. 23 : 661-665.

Hardarson, G. and S.K.A. Danso 1993. Methods for measuring biological nitrogen fixation in grain legumes. Plant and Soil 152: 19-23.

Harris, G. H. et O. B. Hesterman. 1990. Quantifying the nitrogen contribution from alfalfa to soil and two succeeding crops using nitrogen-15. Agron. J. 82:129-134.

Haynes, R.J. 1986. Origin, distribution, and cycling of nitrogen in terrestrial ecosystems. Pages 1-51 *dans* R. J. Haynes (éd) : Mineral nitrogen in the plant-soil system. Academic Press. Orlando.

Heichel, G. H. 1987. Legumes as a source of nitrogen in convention tillage systems. Pages 29-35 *dans* : The role of legumes in conservation tillage systems. Soil

Conservation society of America, Ankeny, Iowa.

Hesterman, O.B. 1988. Exploiting forage legumes for nitrogen contribution in cropping systems. Dans W.L. Hargrove (Éd), Cropping strategies for efficient use of water and nitrogen. Spec. Publ. 51 ASA-CSSA-SSSA, Madison, WI.

Hesterman, O. B., M. P. Russelle, C. C. Sheaffer et G. H. Heichel. 1979. Nitrogen utilization from fertilizer and legume residues in legume-corn rotations. Agron. J. 79:726-731.

Huntington, T.G., J.H. Grove et W.W. Frye. 1985. Release and recovery of nitrogen from winter annual cover crops in no-till corn production. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 16: 193-211.

Isfan, D., J. Ziska, A D'Avignon and M. Deschênes. 1995. Relationships between nitrogen rate, plant nitrogen concentration, yield and residual soil nitrate-nitrogen in silage corn. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 26:2531-2557.

Jolivet, E. et J.F. Morot-Gaudry. 1984. Complexité et importance des interrelations azote-carbone. Pages 367 - 380 dans Physiologie de la production du maïs. INRA. France.

Jones, R. D. et A. P. Schwab. 1993. Nitrate leaching and nitrite occurrence in a fine textured soil. Soil science 155:272-282.

Jury, W. A. et D. R. Nielsen. 1989. Nitrate transport and leaching mechanisms. Pages 139-157 dans R. F. FOLLET (éd) : Nitrogen management and groundwater protection. Elsevier, Amsterdam.

Knox, E. et D. W. Moody. 1991. Influence of hydrology, soil properties and agricultural land use on nitrogen in groundwater. Pages 19-57 dans D. R. Keeney, R. F. Follet et R.

M. Cruse (éd) : Managing nitrogen for groundwater quality and farm profitability. SSSA/ Madison, WI. USA.

Ladd, J.N. and M. Amato. 1986. The fate of nitrogen from legume and fertilizer source in soils successively cropped with wheat under field conditions. Soil Biol. Biochem 18:417-425.

Lamaze, T., S. Khamis, C Foyer, J. Farineau, M.H. Valadier et J.F. Morot-Gaudty. 1990 Effet d'une limitation en N sur la photosynthèse chez le maïs. Pages 113-121 Dans Physiologie et production du maïs. INRA, Paris.

LaRue, T.A. et T.G. Patterson. 1981. How much nitrogen do legume fix? Adv. Agron 34:15-38.

Layzell, D.B. 1990. N₂ fixation, NO₃⁻ reduction and NH₄⁺ assimilation. Pages 389-413 Dans, Plant physiology, biochemistry and molecular biology. D.T. Dennis et D.H. Turpin (ed). Longman Scientific & Technical. Singapore.

Ledgard, S.F., J.R. Freney et J.R. Simpson. 1985. Assessing nitrogen transfer from legumes to associated grasses. Soil Biol. Biochem. 17(4) : 575-577.

Legg, J.O. et J.J. Meisinger. 1982. Soil nitrogen budgets. Pages 503-566 dans, F.J. Stevenson (Éd.), Nitrogen in agricultural soils. Agron. Monogr. 22. ASA-CSSA-SSSA. Madison, WI.

Liang, B.C. and A.F. Mackenzie. 1994. Corn Yield, nitrogen uptake and nitrogen use efficiency as influenced by nitrogen fertilization. Can. J. Soil Sci. 74: 235-240.

Luissier, S. 1995. Les unités thermiques et la classification des hybrides : un défi à relever. Pages 181-187 Dans, Compte rendu de conférences, Colloque sur le maïs-grain. Conseil des Productions Végétales du Québec 227 p.

Machet, J. M. 1987. L'apport des techniques isotopiques à la stratégie de fertilisation. Perspectives Agricoles 115: 37-42.

MacKenzie, A.F. 1977. Soil fertility studies with five crops on mineral soils. Department of Renewable Ressources, MacDonald College, McGill University, Sainte-Anne de Bellevue, Québec.

MacKenzie, A.F. 1979. Effects of fertilizers and soil series on yields of corn, barley, wheat and soybeans. A summary, 1968-1978. Department of Renewable Ressources, MacDonald College, McGill University, Sainte-Anne de Bellevue, Québec.

Major, D.C. and R.I. Hamilton, 1978. adaptation of corn for whole plant silage in Canada. Can. J. Plant Sci. 63 : 121-130.

Martin, R.C., H.D. Voldeng et D.L. Smith. 1991. Nitrogen transfer from nodulating soybean (*Glycine max* L. Merr.), to corn (*Zea mays* L.) and non-nodulating soybean in intercrops : direct ¹⁵N labelling methods. New Phytol. 117 : 233-241.

Mathers, A.C., B.A. Stewart et B. Blair. 1975. Nitrate nitrogen removal from soil profiles by alfalfa. J. Environ. Qual. 4:403-405.

Meisinger, J. J. et G. W. Randall. 1991. Estimating nitrogen budgets for soil-crop systems. Pages 85-124 dans : D. R. Keeney, R. F. Follet et R. M. Cruse (éd) : Managing nitrogen for groundwater quality and farm profitability. SSSA, Madison, WI. USA.

Ménard, L. 1996. État d'avancement de l'approche globale en fertilisation intégrée au Québec. Pages 225-239, Dans Colloque sur la fertilisation intégrée des sols, cahier de conférences. Conseil des Productions Végétales du Québec 257 p.

Mills, H. A. et J. B. Jones, Jr. 1979. Nutrient deficiencies and toxicities in plants : Nitrogen. *J. Plant Nutr.* 1:101-122.

Ministère de l'Environnement du Québec (MENVIQ), 1993. *Etat de l'environnement au Québec 1992*. Ministère de l'Environnement du Québec. Guerin, Montréal. Canada, 550p.

Mosier, A. R. et D. S. Schimel. 1993. Nitrification and denitrification. Pages 181-208 *dans* R. Knowles et T. H. Blackburn (éd) : *Nitrogen isotope techniques*. Academic Press.

Mvondo-Awono, J.P. 1988. Nitrogen nutrition and susceptibility of sweet corn (*Zea mays* L. var. *rugosa*) to drought. Master of Science Thesis. University of California, Davis. USA.

Ouellet, C.E. et R.L. Desjardins. 1981. Interprétation des relations entre le climat et la survie à l'hiver de la luzerne par l'analyse des corrélations. *Can. J. Plant Sci.* 61 : 945-954.

Paré, T. et Chalifour, F.P. 1993. Efficacité d'utilisation de l'N de différents systèmes culturaux céréales-légumes afin de limiter les émissions d'oxyde nitreux (N₂O). *Revue bibliographique*. Contrat No ASC:01396-2-C064/01-XSK. Ministère de l'Agriculture. 68p.

Paré, T., Chalifour, J. Bourassa et H. Antoun. 1992. Forage-corn dry matter yields and N uptake as affected by previous legume and nitrogen fertilizer. *Can. J. Plant Sci.* 72: 699-712.

Paré, T., Chalifour, J. Bourassa et H. Antoun. 1993a. Forage-corn production and N-fertilizer replacement values following 1 or 2 years of legumes. *Can. J. Plant Sci.* 73: 477-493.

Paré, T., Chalifour, J. Bourassa et H. Antoun. 1993b. Residual effects of faba bean and soybean for a second or third succeeding forage-corn production. *Can. J. Plant Sci.* 73: 495-507.

Patra, D.D., M.S.Sachdev and B.V. Subbiah. 1986. 15N studies on the transfer of legume-fixed nitrogen to associated cereals in intercropping systems. *Biol Fertil. Soils* 2 : 165-171.

People, M.B. and E.T. Craswell. 1992. Biological nitrogen fixation : Investments, expectations and actual contributions to agriculture. *Plant and Soil* 141 : 13-39.

Peterson, T.A. et M.P. Russelle. 1991. Alfalfa and the nitrogen cycle in the Corn Belt. *J.Soil and Water Cons.* 46: 229-235.

Pfarr, D.G. 1987. Nitro: A non dormant alfalfa variety for maximum single year production. *J. Prod. Agric.* 1: 182-183.

Plenet, D., E. Lubet, P. Desvignes et F. Sombrun. 1990. Fertilisation et composantes du rendement du maïs : effets des niveaux et des modalités d'apport. Pages 367-382 Dans, *Physiologie et production du maïs*. INRA, Paris.

Prasad, R., G. B. Rajale et B. A. Lakhdive. 1971. Nitrification retarders and slow-release nitrogen fertilizers. *Advances in Agronomy* 23:337-383.

Russelle, M. P., O. B. Hesterman, C. C. Sheaffer et G. H. Heichel. 1987. Estimating nitrogen and rotation effects in legume-corn rotations. Pages 29-35 *dans* : *The role of legumes in conservation tillage systems*. Soil Conservation society of America, Ankeny, Iowa.

Saint-Pierre, C.A. et J.E. Chevrette. 1979. *Les céréales et le maïs*. Département d'alimentation. Université Laval. Sainte-Foy, QC.

Sarrantonio, M. et T.W. Scott. 1988. Tillage effects on availability of nitrogen to corn following a winter green manure crop. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52: 1661-1668.

Schrader, L.E., D. Domska, P.E. Jung et L.A. Peterson. 1972. Uptake and assimilation of ammonium-N and nitrate-N and their influence on the growth of corn. *Agron. J.* 64:690-695.

Sebillotte, J. 1987. L'excès de nitrates dans les eaux : un problème à résoudre, une lutte engagée. *Perspectives Agricoles.* 115: 12-17.

Senaratne, R. et G. Hardarson. 1988. Estimation of residual N effect of faba bean and pea on two succeeding cereals using ^{15}N methodology. *Plant Soil* 110:81-89.

Sheaffer, C.C., D.K. Barnes, G.H. Heichel, G.C. Martens and W.E. Lueschen. 1988. Seeding year nitrogen and dry matter yields of nondormant and moderately dormant alfalfa. *J. Prod. Agric.* 1:261-265.

Sheaffer, C.C., D.K. Barnes, G.H. Heichel. 1989. "Annual" alfalfa in crop rotations. *Station Bulletin 588-1989. Minnesota Agric. Exp. Stn. and Univ. of Minnesota St-Paul, Minnesota.*

Simard, R.R. 1995. Le devenir des éléments fertilisants en production de maïs. Pages 115-133. *Compte rendu de conférences, Colloque sur le maïs-grain. Conseil des Productions Végétales du Québec* 227 p.

Simard, R.R. and A. N'Dayegamiye. 1993. Nitrogen mineralization potential of meadow soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 36 : 465-472.

Singh, B., D. S. Rana et G. S. Sekhon. 1978. Some measures of reducing leaching loss of nitrates beyond potential rooting zone. IV Intercropping. *Plant Soil* 49:633-639.

Stanford, G. 1973. Rationale for optimum nitrogen fertilization in corn production. J. Environ. Qual. 2 : 159-166.

Stanford, G et J.O. Legg. 1984. Nitrogen and yield potential. Pages 263-272 Dans, Nitrogen in crop production. ASA-CSSA-SSSA. Madison, USA.

Stevenson, F. J. 1986. Cycles of soil : Carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur, micronutrients John Wiley & Sons. New York.

Tabi, M., L. Tardif, D. Carrier, G. Laflamme and M. Rompré. 1990. Rapport de synthèse. Entente auxiliaire Canada-Québec sur le développement agro-alimentaire. Publ. no. 90-130156, Gouvernement du Québec, Québec, PQ. 71 pp.

Tendille, C., C. Gervais, Y. Coic and T. Gaborit. 1972. Influence de la nature de l'alimentation azotée minérale sur la composition en substances azotées de sèves exsudées de racines de maïs et de tomate. Agrochimica, 16, 507 - 518.

Tisdale, S. L., W. L. Nelson et J. D. Beaton. 1985. Soil fertility and fertilizers. 4th Ed. Macmillan, New York.

Tran, T. S. 1994. Efficacité et devenir de l'engrais azoté marqué ^{15}N appliqué à la culture de maïs (*Zea mays* L.). Thèse de Doctorat. Université Laval, Sainte-Foy, 157 pp.

Tran, T. S. 1996. Utilisation rationnelle de l'N en agriculture. Colloque sur la fertilisation intégrée des sols. Compte rendu des conférences. Conseil des Productions Végétales du Québec 257 p.

Tran, T.S., M. Giroux et A. N'Dayegamiye. 1992. Utilisation rationnelle des fumures azotées minérales : aspects agronomiques et environnementaux. Agrosol V (2) : 18-25.

Tucker, T. C. 1984. Diagnosis of nitrogen deficiency in plants. pp. 249-262. dans : Nitrogen in crop production. ASA-CSSA-SSSA. Madison. WI. USA.

Van Kessel, C., P.W. Singleton and H.J. 1985. Enhanced N-transfer from soybean to maize by vesicular arbuscular mycorrhizal (VAM) fungi. Plant Physiology 79: 562-563.

White, K. D. 1970. Fallowing, crop rotation and crop yields in roman times. Agr. Hist. 44:281-290.

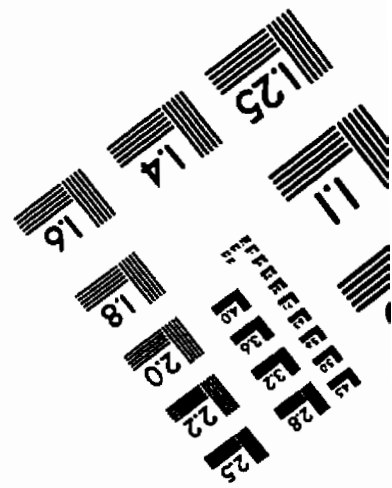
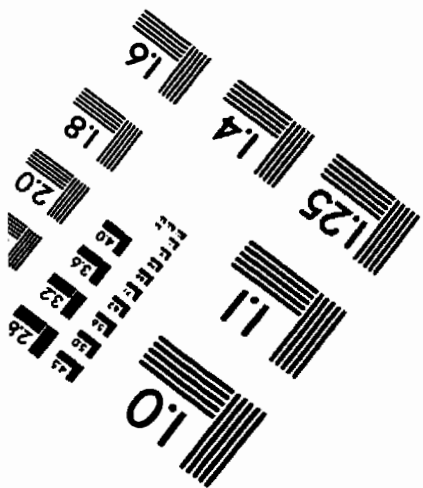
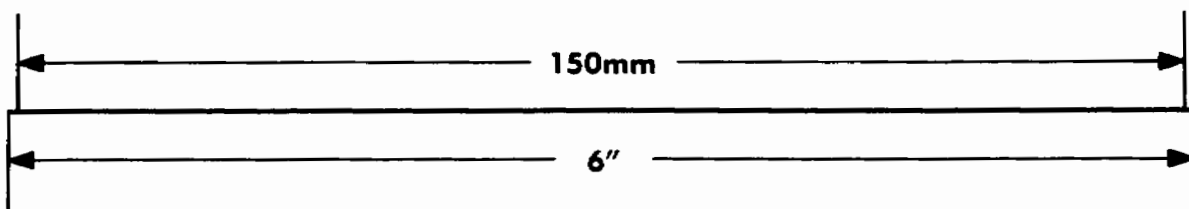
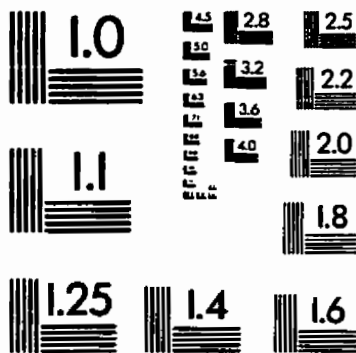
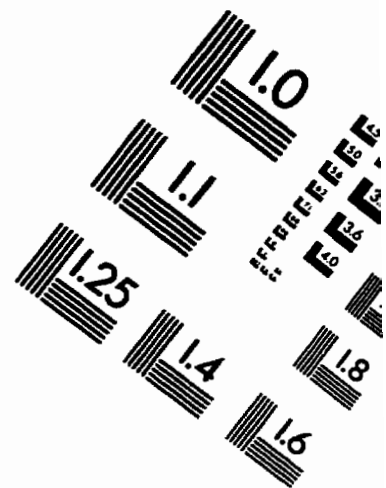
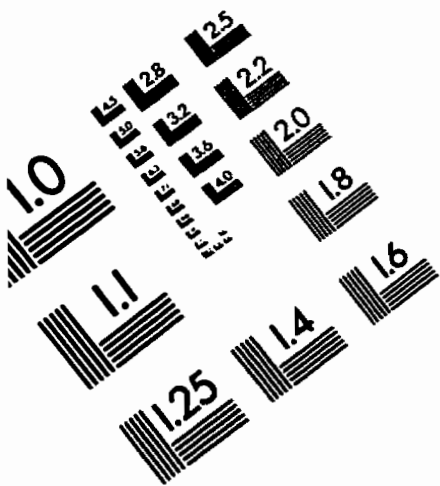
Walker, W.M. et T.R. Peck. 1972. A comparison of the relationship between corn yield and nutrient concentration in whole plants and different plant parts at early tassel at two locations. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 3:513-523.

Xie, R. et A.F. Mackenzie, 1986. Urea and Manure effects on soil nitrogen and corn dry matter yields. Soil Sci. Soc. Am. J. 50 : 1504 - 1509.

Zhang, Z., M. Nyborg, M. Worsley, K.M. Worsley et D.A. Dower. 1992. Guanidine sulphate: slow release of mineral nitrogen during incubation in soil. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 23 : 431-439.

Zizka, J. et D. Isfan. 1990. Effet des sources, des méthodes d'application et du fractionnement de l'N chez le maïs fourrager. Naturaliste Can. 117 : 183-188.

IMAGE EVALUATION TEST TARGET (QA-3)



APPLIED IMAGE, Inc
1653 East Main Street
Rochester, NY 14609 USA
Phone: 716/482-0300
Fax: 716/288-5989

© 1993, Applied Image, Inc., All Rights Reserved