

**NOURA ZIADI**

**OPTIMISATION DE LA FERTILISATION MINÉRALE DANS LA  
PRODUCTION DES FOURRAGES SOUS CLIMAT CONTINENTAL FRAIS**

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

AVRIL 1999

© Noura ZIADI, 1999



National Library  
of Canada

Acquisitions and  
Bibliographic Services

395 Wellington Street  
Ottawa ON K1A 0N4  
Canada

Bibliothèque nationale  
du Canada

Acquisitions et  
services bibliographiques

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.

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 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.

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.

0-612-39409-3

Ce 9<sup>e</sup> jour du mois de avril 19 99, les personnes soussignées, en leur qualité de membres du jury de la thèse de Madame Noura Ziadi, ont assisté à la soutenance de cette thèse.

<u>NOMS</u>	<u>UNIVERSITÉ</u>	<u>SIGNATURE</u>
<u>Régis Simard</u>	<u>Agriculture et agro-alimentaire Canada</u>	
<u>Guy Allard</u>	<u>Université Laval</u>	
<u>Sen Tran</u>	<u><del>MAPAQ</del> IRDA</u>	
<u>Gilles Bélanger</u>	<u>Agriculture et agro-alimentaire Canada</u>	
<u>Ghislain Gendron</u>	<u>Université Laval</u>	

John Zee, vice-doyen à l'enseignement

SIGNATURE DU PRÉSIDENT DE LA SOUTENANCE

***DÉDICACE***

---

***À Nada et Mohamed***

## RÉSUMÉ COURT

L'effet des engrais minéraux N, P et K sur la production de graminées fourragères a été étudié sur quatre sols argileux dans la région de l'Abitibi-Témiscamingue (Ouest du Québec) de 1994 à 1996. Suite aux résultats obtenus au champ, des études complémentaires ont été effectuées en laboratoire afin de mieux caractériser la capacité des sols de cette région à fournir des éléments nutritifs à partir de leur réserves. L'objectif général de l'étude était d'évaluer l'effet de la fertilisation azotée, phosphatée et potassique sur les prairies à base de graminées fourragères sous les conditions pédoclimatiques de la région de l'Abitibi-Témiscamingue. La fléole des prés était l'espèce principale. Cinq doses de N, P et K ont été appliquées annuellement durant trois années en deux fractions, soient 50% au printemps et 50% après la première coupe des fourrages. Les rendements des fourrages ont augmenté avec les doses de N. La fertilisation phosphatée a eu un effet significatif sur le rendement seulement à la dernière année, alors que l'apport de K n'a eu aucun effet sur la production des fourrages. La méthode de dosage des nitrates à l'aide des membranes d'échanges anioniques (AEMs) a été mise au point et s'est avérée plus efficace que les méthodes conventionnelles utilisant les extractifs chimiques, en particulier l'extraction à l'eau. L'étude de la cinétique de désorption de P et de K à l'aide de la technique d'Électro-ultrafiltration (EUF) a démontré la richesse naturelle des sols de l'Abitibi-Témiscamingue en P et en K. En conclusion, les graminées fourragères produites en Abitibi-Témiscamingue ont besoin de plus de N et de moins de P et de K comparées aux autres régions de la province de Québec.

R. R. Simard  
Directeur de thèse

G. Allard  
Co-directeur de thèse

N. Ziadi  
Candidate au doctorat

## RÉSUMÉ LONG

Les plantes fourragères constituent la principale production végétale de la région de l'Abitibi-Témiscamingue (Ouest du Québec). Les superficies consacrées à ces espèces sont d'environ 92 500 ha représentant ainsi 43% des superficies cultivées de la région. Soixante-dix pour cent de ces fourrages sont des graminées dont la fléole des prés (*Phleum pratense* L.) constitue l'espèce dominante. Les besoins de ces cultures en éléments nutritifs sont généralement complétés par l'apport d'engrais minéraux, soient le phosphore (P), le potassium (K) et principalement l'azote (N). L'utilisation efficace et rationnelle de ces engrais doit à la fois améliorer la rentabilité des exploitations agricoles et diminuer les risques de pollution de l'environnement. Une très grande proportion de la superficie cultivée en Abitibi-Témiscamingue sont des argiles lourdes, caractéristiques de la région. De plus, les sols de la région n'ont pas été étudiés lors de la calibration des besoins en engrais minéraux et même la calibration effectuée n'a pas pris en considération les champs à prédominance de graminées fourragères.

Ainsi, l'impact de la fertilisation azotée, phosphatée et potassique a été étudié sur deux sites en Abitibi et deux sites au Témiscamingue de 1994 à 1996. Cinq doses de N, P et K ont été appliquées annuellement durant les trois années en deux apports, soit 50% au printemps et 50% après la première coupe des fourrages.

Les apports d'engrais azoté ont eu un effet positif sur le rendement en fourrages durant les trois années. En moyenne, le rendement en MS était de 2,7 Mg ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup> sans N et 5,2 Mg ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup> avec 240 kg ha<sup>-1</sup>. L'utilisation des doses de N allant jusqu'à 240 kg N ha<sup>-1</sup> ne semble ni causer le lessivage des nitrates à une profondeur de 60 cm ni affecter la qualité des fourrages produits. Les nitrates dosés par les résines d'échange anionique ( $\text{NO}_{3\text{AEM}_s}$ ) sont significativement corrélés avec les nitrates dosés à l'eau ( $\text{NO}_{3\text{w}}$ ) ( $R^2 = 0,35$  à  $0,98$ ). Durant les deux saisons de croissance (1995 et 1996) et à tous les sites, les  $\text{NO}_{3\text{AEM}_s}$  ont linéairement augmenté avec la dose de N apportée au sol. Le rendement des fourrages ainsi que le prélèvement en N par les fourrages ont significativement été corrélés avec  $\text{NO}_{3\text{AEM}_s}$ . De plus, une étude économique a révélé que les  $\text{NO}_{3\text{AEM}_s}$  prédisent mieux les besoins en N pour les fourrages que les  $\text{NO}_{3\text{w}}$  sous des conditions continentales fraîches de la région de l'Abitibi-

Témiscamingue. Basée sur ces avantages, l'utilisation des AEMs semble être plus prometteuse que les extractifs chimiques en ce qui a trait à la prédiction de la disponibilité des éléments nutritifs pour les fourrages à base de graminées, entre autres, l'azote.

L'apport d'engrais phosphaté jusqu'à des doses de  $120 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$  n'a eu un effet significatif positif sur le rendement des fourrages que seulement à la dernière année d'étude au champ. Ainsi, la technique d'Électro-Ultrafiltration (EUF) a été comparée à d'autres méthodes chimiques pour caractériser la désorption du phosphore des sols à l'étude. Le phosphore a été désorbé à partir des sols ayant reçu  $120 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$  durant trois saisons de croissance et à partir d'un témoin non fertilisé. La quantité cumulative de P désorbé du témoin par EUF à  $20^\circ\text{C}$  et  $200 \text{ V}$  après  $75 \text{ min}$  a varié entre  $10$  et  $69 \text{ mg P kg}^{-1}$ . Des corrélations significatives ont été obtenues entre les quantités de P extraites par les méthodes chimiques (eau, Olsen, résines et Mehlich 3) et celles désorbées par EUF. Ainsi, l'étude complémentaire en laboratoire en utilisant la technique d'EUF a révélé que les sols étudiés ont des réserves assez importantes en P et que le manque de réponse des fourrages à l'engrais phosphaté est attribué aux réserves des sols étudiés en P.

Quant à la fertilisation potassique, son apport allant jusqu'à  $200 \text{ kg K}_2\text{O ha}^{-1}$  n'a eu aucun effet sur le rendement des fourrages durant les trois années d'étude. La technique d'EUF a été alors comparée au  $1\text{M NH}_4\text{OAc}$ , Mehlich3, ou  $1\text{M HNO}_3$  pour caractériser la désorption du K des sols à l'étude. Une étude de cinétique de désorption de K a été également effectuée en utilisant la technique d'EUF. La quantité cumulative de K ainsi désorbée par l'EUF a varié de  $199$  à  $342 \text{ mg K kg}^{-1}$  selon les sites et les traitements choisis. La cinétique de désorption de K des quatre sols en utilisant la technique d'EUF a adéquatement été décrite par cinq modèles cumulatifs. Un modèle incrémental de premier ordre a également été testé et s'est avéré plus efficace à décrire les données que les modèles cumulatifs. Ainsi, la technique d'EUF a démontré que la non-réponse des fourrages à l'apport d'engrais potassiques est attribuable à la richesse en K de ces sols très argileux.

En conclusion, les fourragères à base de graminées produites en Abitibi-Témiscamingue ont besoin de quantités plus élevées en N comparé à ceux produits dans d'autres régions de la province. Les apports de N nécessaires, supérieurs à ceux rapportés par le

CPVQ (1994), sont en partie expliqués par la faible minéralisation de l'azote du sol au printemps vues les conditions pédoclimatiques spécifiques de la région. L'utilisation des AEMs pour doser les nitrates du sol est une méthode prometteuse comparée à l'extraction à l'eau. L'étude de la cinétique de désorption de P et de K à l'aide de la technique de l'EUF a révélé que la non-réponse des fourrages aux engrais phosphaté et potassique peut, en partie, être attribuée à la richesse naturelle des sols étudiés en ces deux éléments. On devrait donc amender les grilles de fertilisation en P et en K pour les fourrages produits sur ces sols très argileux.

R. R. Simard  
Directeur de thèse

G. Allard  
Co-directeur de thèse

N. Ziadi  
Candidate au doctorat



## AVANT-PROPOS

La quantification et la compréhension de l'impact de la fertilisation minérale dans la production végétale demeurent la clé du développement de systèmes de culture à la fois productifs et sains pour l'environnement. Toutefois, plusieurs facteurs peuvent influencer la disponibilité des éléments nutritifs apportés au sol.

Cette étude a été réalisée dans le but d'évaluer l'effet de la fertilisation azotée, phosphatée et potassique des fourrages produits en Abitibi-Témiscamingue. Ayant des conditions pédoclimatiques différentes du reste de la province du Québec, les besoins en N, P et K des fourrages pourraient être différents de ceux recommandés ailleurs au Québec.

La thèse est présentée en sept chapitres. Le premier comprend une introduction générale et une revue de littérature exhaustive englobant l'ensemble des thèmes de recherche traités par l'étude. Cette revue de littérature est divisée en deux parties principales: la première partie traite de l'importance de N, P et K dans la production des fourrages alors que la deuxième décrit quelques méthodes (extractions chimiques, AEMs et EUF) d'analyse de sol pour prédire la disponibilité des nutriments aux plantes.

Le deuxième chapitre comprend le matériel et les méthodes utilisés au champ et en laboratoire pour répondre à l'ensemble des objectifs fixés. Sachant que la plupart des objectifs ont été réalisés à partir des essais conduits en Abitibi-Témiscamingue et que tous les détails ne seront pas fournis dans les chapitres qui suivent, il a été jugé intéressant et utile de présenter tous les détails du matériel et des méthodes dans un chapitre à part.

Les résultats sont rapportés dans les chapitres III, IV, V, VI et VII qui sont rédigés de façon indépendante en anglais sous forme d'articles scientifiques. Toutefois, pour répondre aux exigences de la Faculté des études supérieures, un résumé en français précède chacun de ces articles. Le chapitre III est accepté pour publication dans la Revue Canadienne de la Science du Sol. Le chapitre IV a été récemment soumis à la même revue pour publication. Les références citées dans les chapitres I et II et VIII sont présentées après les conclusions et

recommandations. L'effet du phosphore et du potassium sur le rendement et le prélèvement en P et K est présenté aux annexes 1 et 2 respectivement.

## REMERCIEMENTS

La réalisation de cette thèse a nécessité la collaboration de plusieurs personnes qu'il me serait difficile de citer nommément sans en oublier quelques unes. Je leur adresse par l'occasion ma profonde gratitude et mes sincères remerciements. Toutefois, j'aimerais remercier très particulièrement :

- Mon directeur de thèse, le Docteur R. R. Simard, chercheur scientifique à Agriculture et Agroalimentaire Canada, pour son encadrement et toutes les facilités dont j'ai bénéficiées tout le long de mon programme de doctorat. Son support scientifique et parfois moral, son esprit critique et également sa rigueur scientifique m'ont permis de progresser avec beaucoup de succès;
- Mon co-directeur, le professeur G. Allard, pour toute sa disponibilité, ses encouragements et sa rigueur scientifique. Je le remercie beaucoup d'avoir accepté de faire la prélecture de ma thèse. Ses remarques et ses suggestions m'ont permis d'améliorer beaucoup la présentation et la qualité de cette thèse;
- Madame T. S. Tran, chercheuse scientifique au service des sols du Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, pour l'aide dont j'ai bénéficiée pendant la réalisation d'une partie de mes travaux surtout en ce qui a trait à l'utilisation de l'Electro-ultrafiltration. L'appui de Mme Tran et son encouragement étaient très appréciés;
- Monsieur G. Bélanger, chercheur scientifique à Agriculture et Agroalimentaire Canada, d'avoir accepté d'agir comme examinateur externe. Mes nombreuses discussions avec lui étaient à la fois enrichissantes et intéressantes;
- Monsieur G. Gendron, pour l'évaluation de ma thèse. Ses commentaires et ses suggestions ont permis l'amélioration de la version finale;

- Le Département de phytologie de l'université Laval, le centre de recherches sur les sols et les grandes cultures d'Agriculture et Agroalimentaire à Sainte-Foy et le service des sols du Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec pour les facilités que j'ai eues à ma disposition tout au long de mon programme de doctorat;
- Les étudiants et les techniciens du laboratoire de chimie des sols de la station de recherche d'Agriculture et Agroalimentaire à Sainte-Foy et du service des sols du Ministère de l'agriculture, des pêcheries et de l'alimentation du Québec pour leur aide aux champs et en laboratoire;
- Tous mes amis, particulier Suzanne Beauchemin, Régis Baziramakenga, Annie Brégard et Jean Pierre Mvondo Awono, pour leur encouragement et leur précieuse collaboration;
- M. J. Garand pour sa bonne compagnie de bureau durant les six années que j'ai passées à la station de recherche d'Agriculture et Agroalimentaire Canada à Sainte-Foy. Nos encouragements mutuels et nos longues 'discussions scientifiques' étaient bénéfiques;
- Mes parents et tous les membres de ma famille et de ma belle famille qui m'ont beaucoup encouragé;
- Mon mari Mohamed, surtout pour sa compréhension, sa patience...

## TABLE DES MATIÈRES

<b>RÉSUMÉ COURT</b> .....	i
<b>RÉSUMÉ LONG</b> .....	ii
<b>AVANT-PROPOS</b> .....	v
<b>REMERCIEMENTS</b> .....	vii
<b>TABLE DES MATIÈRES</b> .....	ix
<b>LISTE DES FIGURES</b> .....	xv
<b>LISTE DES TABLEAUX</b> .....	xvii

### CHAPITRE I

1.1 INTRODUCTION GÉNÉRALE .....	1
1.2 REVUE DE LITTÉRATURE .....	2
1.2.1 Aperçu général sur la région de l'Abitibi-Témiscamingue .....	2
1.2.2 Importance de l'azote, du phosphore et du potassium dans la production du fourrage à base de graminées .....	3
A. Azote .....	3
A.1 Principales sources d'azote dans les agro-écosystèmes .....	3
A.2 Effet de l'azote sur la production de fourrages: rendement et qualité .....	5
B. Phosphore .....	7
B.1 Principales sources de phosphore dans les agro-écosystèmes .....	7
B.2 Effet du phosphore sur la production de fourrage: rendement et qualité .....	8
C. Potassium .....	8
C.1 Principales sources du potassium dans les agro-écosystèmes .....	8
C.2 Effet du potassium sur la production de fourrages: rendement et qualité .....	9
D. Interactions entre les trois éléments majeurs : N, P et K.....	10
1.2.3 Comparaison entre quelques méthodes d'analyse du sol .....	11

1.2.3.1 Extractifs chimiques .....	11
1.2.3.2 Utilisation des résines d'échange ioniques .....	13
1.2.3.3 Utilisation de la technique d'Électro-Ultrafiltration (EUF) .....	14
A. Aperçu sur la technique d'EUF .....	14
B. Extraction du phosphore par EUF .....	15
C. Extraction du potassium par EUF .....	17
1.3. HYPOTHESES .....	17
1.4. OBJECTIFS .....	18

## **CHAPITRE II MATÉRIEL ET MÉTHODES**

2.1 EXPÉRIMENTATION AU CHAMP .....	19
2.2 ANALYSES EFFECTUÉES .....	21
2.2.1 Analyse du sol .....	21
2.2.2 Analyse des plantes .....	22
2.3 MISE AU POINT DE LA MÉTHODE DE DOSAGE DES NITRATES PAR LES MEMBRANES D'ÉCHANGE ANIONIQUE (AEMs) .....	22
2.3.1 Caractéristiques des membranes utilisées .....	22
2.3.2 Essais en laboratoire .....	22
2.3.2.1 Saturation des membranes .....	22
2.3.2.2 Expériences au champ.....	23
2.4 UTILISATION DE LA TECHNIQUE D'EUF .....	23

## **CHAPITRE III ÉVALUATION AU CHAMP DES MEMBRANES D'ÉCHANGE ANIONIQUE COMME MÉTHODE D'ANALYSE DE SOL POUR L'AZOTE SOUS PRAIRIES**

RÉSUMÉ .....	25
ABSTRACT .....	26
INTRODUCTION .....	27
MATERIALS AND METHODS .....	28
Soil Characteristics .....	28
Determination of Soil Properties .....	28

Field Experiments .....	29
Field Evaluation of AEMs .....	29
Statistical Analyses .....	31
<b>RESULTS AND DISCUSSION .....</b>	<b>32</b>
Climatic Conditions .....	32
Impact of Nitrogen Fertilizer on the NO <sub>3</sub> -N Sorbed on AEMs and Extracted by Water .....	32
Variation of NO <sub>3</sub> -N Patterns .....	33
Relationship Between Water and AEMs-Extractable NO <sub>3</sub> -N .....	34
Relationship Between NO <sub>3</sub> AEMs Fluxes, Seasonal Forage DM Yield and Seasonal Forage N Uptake .....	35
<b>CONCLUSION .....</b>	<b>36</b>
<b>ACKNOWLEDGMENTS .....</b>	<b>37</b>
<b>REFERENCES .....</b>	<b>38</b>
<b>LEGEND OF FIGURES .....</b>	<b>44</b>

**CHAPITRE IV RÉPONSE DES FOURRAGES À LA FERTILISATION  
AZOTÉE EN RELATION AVEC LA TENEUR DU SOL  
EN NITRATES MESURÉS PAR LES MEMBRANES  
D'ÉCHANGE ANIONIQUE (AEMs)**

<b>RÉSUMÉ .....</b>	<b>60</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>61</b>
<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>62</b>
<b>MATERIALS AND METHODS .....</b>	<b>63</b>
Field Study and Treatments .....	63
Plant Harvest and Analysis .....	63
Soil analysis .....	64
Statistical Analyses .....	64
<b>RESULTS AND DISCUSSION .....</b>	<b>66</b>
Effect of N Applied on Yields, N Uptake, and Forage NO <sub>3</sub> -N Content .....	66
Economically Optimum N Fertilizer Rate .....	68
Relationship Between N <sub>op</sub> , Relative Yield and Soil NO <sub>3</sub> -N Content .....	68

CONCLUSIONS .....	70
ACKNOWLEDGMENTS .....	70
REFERENCES .....	71
LIST OF FIGURES .....	75

**CHAPITRE V ÉVALUATION DE LA DISPONIBILITÉ DU  
PHOSPHORE AUX FOURRAGES PAR ÉLECTRO-  
ULTRAFILTRATION ET PAR D'AUTRES MÉTHODES  
CHIMIQUES**

RÉSUMÉ .....	85
ABSTRACT .....	86
INTRODUCTION .....	87
MATERIALS AND METHODS .....	88
Field Experiments and Determination of Soil Properties .....	88
Characterization of the Soil P Status.....	89
Electro-Ultrafiltration Technique .....	90
Statistical Analyses .....	91
RESULTS AND DISCUSSION .....	91
Soil Characteristics .....	91
Soils Phosphorus Status .....	92
Phosphorus Desorption .....	93
Relationships Between P Desorbed by EUF and by Other Procedures .....	94
Relationship Between Different Phosphorus-Availability Indices and Phosphorus Uptake by Forage .....	95
CONCLUSION .....	96
REFERENCES .....	97
LIST OF FIGURES .....	100

**CHAPITRE VI ÉVALUATION DE LA CAPACITÉ D'APPROVISION-  
NEMENT EN POTASSIUM DES SOLS DE L'ABITIBI-  
TÉMISCAMINGUE PAR L'ÉLECTRO-ULTRAFILTRA-  
TION ET PAR QUELQUES MÉTHODES CHIMIQUES**

RÉSUMÉ .....	109
--------------	-----



ABSTRACT .....	110
INTRODUCTION .....	111
MATERIALS AND METHODS .....	112
Soil Characteristics and Field Experiments .....	112
Determination of Soil Properties and Laboratory Experiment .....	113
Chemical Extractions .....	113
EUF Procedure .....	114
(1) Standard EUF Procedure .....	114
(2) Potassium Reserve Characterization .....	114
Statistical Analyses .....	115
RESULTS AND DISCUSSION .....	115
Soil Characteristics .....	115
Potassium Status of Studied Soils .....	116
Relationship Between K Desorbed by EUF and Chemical Extractions .....	118
Relationship between Different Potassium Availability Indices and Grass K Uptake .....	119
CONCLUSION .....	120
REFERENCES .....	121
LIST OF FIGURES .....	124
 <b>CHAPITRE VII MODÈLES MATHÉMATIQUES DÉCRIVANT LA CINÉTIQUE DE DÉSORPTION DU POTASSIUM PAR ÉLECTRO-ULTRAFILTRATION</b>	
RÉSUMÉ .....	134
ABSTRACT .....	135
INTRODUCTION .....	136
MATERIALS AND METHODS .....	137
Field Experiments .....	137
Laboratory Study: Kinetics of Soil K Release .....	138
Statistical Analyses .....	138

RESULTS AND DISCUSSION .....	140
Soil Characteristics .....	140
Cumulative K Release .....	140
Kinetics of K Release .....	141
Potassium Release Models and Grass K Uptake .....	143
SUMMARY .....	144
REFERENCES .....	145
LIST OF FIGURES .....	147
<b>CHAPITRE VIII CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS .....</b>	<b>156</b>
<b>RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....</b>	<b>162</b>
<b>ANNEXES</b>	
Annexe 1 : Effet de P sur les rendements et le prélèvement en P par les fourrages .....	171
Annexe 2 : Effet de K sur les rendements et le prélèvement en K par les fourrages .....	182

## LISTE DES FIGURES

## CHAPITRE I

<b>Fig. 1</b> Cycle de l'azote (reproduite d'après Sims 1995) .....	4
<b>Fig. 2</b> Cycle du phosphore (reproduite d'après Bockman et al. 1990) .....	7
<b>Fig. 3</b> Différentes formes de K dans le sol (reproduite d'après Simard et al. 1990) ...	9
<b>Fig. 4</b> Appareil de l'Électro-ultrafiltration (reproduite d'après Németh, 1978) .....	15

## CHAPITRE III

<b>Fig. 1</b> NO <sub>3</sub> -N sorbed on AEMs and extracted by water at several sampling dates in 1995 and 1996. Each value represent the mean of the four sites. Bars indicate standard error of the mean for each sampling date .....	52
<b>Fig. 2</b> Relationship between soil organic matter content and NO <sub>3</sub> -N sorbed on AEMs (a) and extracted by water (b) from the control treatment in spring 1995 and 1996. Bars indicate standard error of the mean for each site .....	53
<b>Fig. 3</b> Relationship between NO <sub>3</sub> -N sorbed on AEMs and extracted by water for the 1995 growing season: (a) first sampling date; (b) second sampling date; (c) third sampling date. Each value represents the mean of the four sites. *,*** Significant at the 0.05 and 0.001 probability level respectively .....	54
<b>Fig. 4</b> Relationship between NO <sub>3</sub> -N sorbed on AEMs and extracted by water for the 1996 growing season: (a) first sampling date; (b) second sampling date; (c) third sampling date. Each value represents the mean of the four sites. *,**,*** Significant at the 0.05, 0.01 and 0.001 probability level respectively .....	55
<b>Fig. 5</b> Relationship between seasonal N uptake and soil NO <sub>3</sub> -N as determined by AEMs and water extraction in spring 1995 and 1996. Lines represent the linear regression. Each value represents the mean of the four sites. *,*** Significant at the 0.05 and 0.001 probability level respectively .....	56
<b>Fig. 6</b> Relationship between NO <sub>3</sub> -N as extracted by AEMs (a) and by Water (b) from N0 treatment in spring 1996 and cumulative N-uptake. Each value represents one replication of each site (three over four; Palmarolle site was left out). **, NS Significant at the 0.01 probability level and not significant respectively .....	57

**CHAPITRE IV**

- Fig. 1** Effect of N fertilization rate on seasonal DM yield in 1994, 1995, and 1996 at the four sites. Fitted quadratic and linear curves are presented with the corresponding parameters in Table 4 ..... 80
- Fig. 2** Relationship between the economic optimum fertilizer rate (Nop) and the extractable NO<sub>3</sub>-N present in spring at 0-15 cm depth as measured by AEMs (a) and by water (b) ..... 81
- Fig. 3** Relationship between the relative yield and the extractable NO<sub>3</sub>-N present in spring at 0-15 cm depth as measured by AEMs (a) and by water (b) ..... 82

**CHAPITRE V**

- Fig. 1** Incremental amount of P extracted by Electro-ultrafiltration (EUF) from the control (Soil sampled in May 1994). Extraction at 200 V and 20°C during 60 min (EUF<sub>0-60</sub> fraction); extraction at 400 V and 80°C during 15 min (EUF<sub>60-75</sub>) ..... 105
- Fig. 2** Cumulative amount of P extracted by Electro-ultrafiltration from the control (Soil sampled in May 1994) vs. time. Extraction at 200 V and 20°C during 60 min (EUF<sub>0-60</sub> fraction) ..... 106

**CHAPITRE VI**

- Fig. 1** Amount of K extracted by Electro-ultrafiltration (EUF) from the control (Soil sampled in May 1994). Extraction at 200 V and 20°C during 60 min (EUF<sub>0-60</sub> fraction); extraction at 400 V and 80°C during 15 min (EUF<sub>60-75</sub>) ..... 130
- Fig. 2** Amount of cumulative K extracted by Electro-ultrafiltration from the control (Soil sampled in May 1994) vs. Time. Extraction at 200 V and 20°C during 60 min (EUF<sub>0-60</sub> fraction) ..... 131

**CHAPITRE VII**

- Fig. 1** Cumulative EUF-K released at 400 V and 80°C vs. Time for the studied soils: (a) Ste-Gertrude, (b) Palmarolle, (c) Laverlochere and (d) Lorraineville ..... 153
- Fig. 2** Amount of incremental K released at 400 V and 80°C vs. Time as predicted by the first order incremental model for the studied soils: (a) Ste-Gertrude, (b) Palmarolle, (c) Laverlochere and (d) Lorraineville ..... 154

## LISTE DES TABLEAUX

### CHAPITRE II

<b>Tableau 2.1</b> Quelques informations relatives aux sites expérimentaux .....	20
<b>Tableau 2.2</b> Recommandations de la fertilisation minérale des sites expérimentaux selon le CPVQ (CPVQ, 1994) .....	21

### CHAPITRE III

<b>Table 1</b> Chemical and physical properties of studied soils .....	46
<b>Table 2</b> Field work calendar in 1995 and 1996 for the Ste-Gertude site .....	47
<b>Table 3</b> Temperature and rainfall during the two growing seasons .....	48
<b>Table 4</b> Analysis of variance (mean square values) of the effects of N fertilizer and sites on NO <sub>3</sub> -N sorbed on AEMs and extracted by water in 1995 and 1996 .....	49
<b>Table 5</b> Analysis of variance (mean square values) for forage N uptake as affected by N fertilizer rates and sites in 1995 and 1996 .....	50
<b>Table 6</b> Effect of N fertilizer on cumulative forage N dry matter yield and cumulative forage N uptake .....	51

### CHAPITRE IV

<b>Table 1</b> Analysis of variance (mean square values) for forage DM yield, N uptake, and NO <sub>3</sub> -N content as affected by N fertilizer rates and sites during the experiment .....	76
<b>Table 2</b> Temperature and rainfall during the three growing seasons .....	77
<b>Table 3</b> Effect of N fertilizer on cumulative forage N uptake and NO <sub>3</sub> -N content .....	78
<b>Table 4</b> Parameters of the quadratic (or linear) equation of cumulative grass yield (Y) as a function of N application rates (X) [Y = a + bX + cX <sup>2</sup> or Y = a + bX], N <sub>op</sub> , and the N fertilizer rate (N <sub>max</sub> ) required to reach maximum yield .....	79

### CHAPITRE V

<b>Table 1</b> Chemical and physical properties of studied soils .....	101
<b>Table 2</b> Amounts of P extracted by selected procedures, P <sub>Q</sub> Ratio, cumulative grass yield, and cumulative P uptake .....	102

<b>Table 3</b> Effects of P application (mean square values) on P extracted by selected procedures, $P_Q$ , cumulative grass yield, and cumulative P uptake .....	103
---	-----

<b>Table 4</b> Simple correlation (r) between P extracted by selected procedures, cumulative grass yield, and cumulative P uptake .....	104
---	-----

## CHAPITRE VI

<b>Table 1</b> Chemical and physical properties of studied soils .....	125
--	-----

<b>Table 2</b> Effects of K application (mean square values) on K extracted by selected procedures, hay yield, cumulative K uptake, and $K_Q$ .....	126
---	-----

<b>Table 3</b> Amounts of K extracted by selected procedures, $K_Q$ , and cumulative K uptake in studied soils .....	127
--	-----

<b>Table 4</b> Correlation coefficients between K extracted by EUF and by chemical methods .....	128
--	-----

<b>Table 5</b> Simple correlation (r) between cumulative forage K uptake and K extracted EUF and by chemical methods .....	129
--	-----

## CHAPITRE VII

<b>Table 1</b> Chemical and physical properties of studied soils .....	148
--	-----

<b>Table 2</b> Effect of K fertilizer (mean square values) on K extracted at 400 V and 80°C ( $K_{0-58}$ ) and cumulative K uptake by grasses .....	149
---	-----

<b>Table 3</b> Coefficient of determination ( $R^2$ ) and standard error of the estimate (SE) of various kinetic models for total K release in studied soils .....	150
--	-----

<b>Table 4</b> Intercept and slope (a and b) values for the tested models describing K release in studied soils .....	151
---	-----

<b>Table 5</b> Correlation coefficients for cumulative K uptake vs a and b values of the various models tested .....	152
--	-----

# CHAPITRE I

## 1.1 INTRODUCTION GÉNÉRALE

Connaître la disponibilité des éléments nutritifs pour les plantes est un facteur primordial dans la réussite des programmes de fertilisation. C'est ainsi que l'utilisation efficace et rationnelle des engrais minéraux permet à la fois l'amélioration de la rentabilité des exploitations agricoles et la diminution des risques de pollution environnementale dont les pratiques agricoles constituent une des principales sources potentielles.

En grandes cultures, les besoins des plantes en nutriments, en particulier l'azote (N), le phosphore (P) et le potassium (K), sont en partie assurés par l'apport d'engrais minéraux. Toutefois, la connaissance des principales transformations de chacun de ces éléments dans le sol demeure primordiale pour l'optimisation de la fertilisation minérale (Simard 1995; Tran 1996). Ainsi, l'utilisation des fertilisants par les cultures est fonction de plusieurs facteurs reliés aux caractéristiques particulières de chacun de ces éléments résumées dans un cycle assez complexe. L'azote demeure toutefois le pivot de la fertilisation minérale des plantes agricoles, en particulier, celle des non-légumineuses.

La région de l'Abitibi-Témiscamingue, caractérisée par un climat continental froid et moyennement humide (Villeneuve 1967), diffère du reste de la province du Québec (Dubé et al. 1982). Les sols de cette région ont également des caractéristiques assez particulières qui proviennent surtout de dépôts glacio-lacustres dont la texture varie de limon à argile. Ces dépôts sont à l'origine d'au moins 90% des sols de l'Abitibi et 80% de ceux du Témiscamingue (Rompré et Carrier 1997). L'agriculture y est basée essentiellement sur les productions laitière et bovine. Les fourrages constituent la principale production végétale dont la fléole des prés est l'espèce dominante.

Au Québec, quelques travaux de recherche ont été entrepris dans le domaine des plantes fourragères tout en touchant à différents aspects (exigences en sol, nutrition minérale, régie, exploitation, etc.). Toutefois, peu d'efforts ont été déployés jusqu'à présent pour la région de l'Abitibi-Témiscamingue. À notre connaissance, à part les travaux de Simard et al. (1989 et

1990) et récemment Rompré et Carrier (1997), peu de recherche a été entreprise dans cette région. De plus, la majorité des travaux a été effectuée en conditions contrôlées sans tenir compte des conditions climatiques particulières de la région. Les sols de cette région n'ont pas été étudiés lors du processus de calibration des besoins en engrais minéraux des cultures (Barnett et al. 1977). De plus, la calibration effectuée n'a pas pris en considération les champs à prédominance de graminées.

C'est ainsi que les conditions pédoclimatiques spécifiques à la région de l'Abitibi-Témiscamingue font démarquer l'agriculture de cette région du reste de la province et nécessitent des études plus appropriées à cette région, d'où la pertinence de la présente étude. Des essais préliminaires effectués au champ par Surprenant et Lafrenière (1992) ont révélé que les besoins en azote de la fléole sont différents de ceux rapportés dans le guide du Conseil des productions végétales du Québec (CPVQ 1994). Par ailleurs, des essais effectués en serre par Simard et al. (1989 et 1990) ont démontré que les sols de cette région ont des réserves importantes en K. Cela suggère que la calibration des besoins en fertilisants minéraux au moyen des méthodes présentement utilisées pour définir les besoins en N, P et K n'est probablement pas adaptée aux sols de l'Abitibi-Témiscamingue. Il est donc primordial de faire un suivi du devenir des engrais minéraux apportés aux sols afin d'évaluer les besoins en N, P et K des fourrages à base de graminées cultivées en Abitibi et au Témiscamingue.

## **1.2 REVUE DE LITTÉRATURE**

### **1.2.1 Aperçu général sur la région de l'Abitibi-Témiscamingue**

La région de l'Abitibi-Témiscamingue occupe tout le Nord-Ouest québécois. Les sols argileux (lourds et limoneux) sont abondants et occupent 78% du territoire cultivé de l'Abitibi et 49% de celui du Témiscamingue (Rompré et Carrier 1997). La température moyenne annuelle de l'air est de 1°C et la moyenne des précipitations est d'environ 850 mm avec plus de 500 mm de mai à octobre (National Atlas of Canada 1974). Toutefois, une légère différence de température entre l'Abitibi et le Témiscamingue existe. Ainsi, le climat continental est plus tempéré au Témiscamingue qu'en Abitibi d'où un retard de la végétation généralement observé au printemps en Abitibi comparé au Témiscamingue. L'humidité relative est plus élevée au Témiscamingue (65%) qu'en Abitibi (51%) pour la période de mai à septembre (Villeneuve



1967). La période sans gel du Témiscamingue (120 à 140 jours) est plus longue que celle de l'Abitibi (50 à 90 jours).

Compte tenu du climat continental retrouvé en Abitibi-Témiscamingue, des hautes teneurs en argile et des propriétés calcaires du sol, l'agriculture de la région possède un aspect particulier qui diffère de celui des autres régions de la province. Ainsi, l'agriculture y est basée essentiellement sur la production de fourrages dont la fléole est l'espèce la plus cultivée.

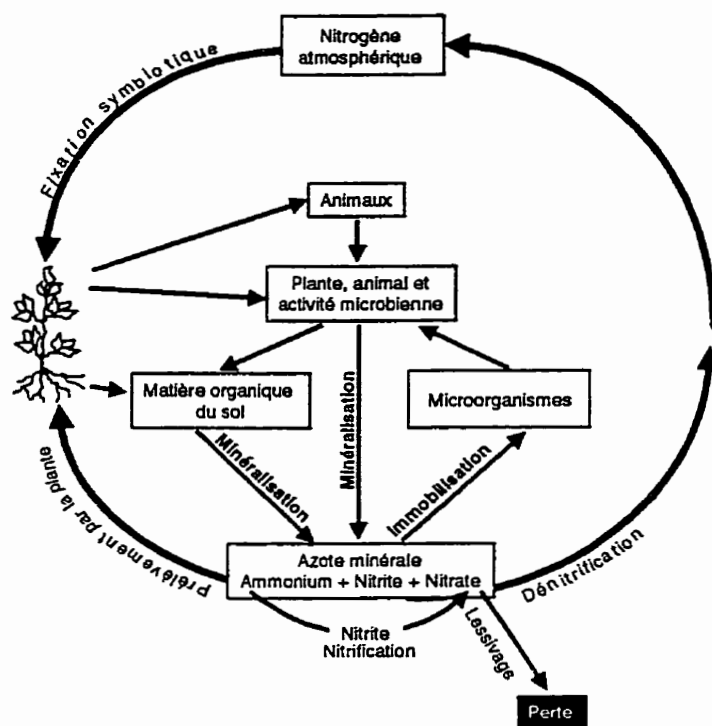
## **1.2.2 Importance de l'azote, du phosphore et du potassium dans la production du fourrage à base de graminées**

### **A. Azote**

#### **A.1 Principales sources d'azote dans les agro-écosystèmes**

À part l'eau, l'azote (N) est le principal facteur limitatif dans la production des espèces végétales, en particulier, les graminées. Les plantes prélèvent leurs besoins en N minéral dans la solution du sol sous forme de nitrate ou d'ammonium. L'azote minéral dans le sol provient de la minéralisation de la matière organique (racines et résidus des plantes), des engrais organiques et minéraux et du dépôt atmosphérique (Neeteson 1995). La minéralisation de l'N est fonction des conditions climatiques, des types de sol et des pratiques culturales. En conséquence, la minéralisation de la matière organique du sol (M.O.) peut libérer entre 50 et 100 kg N ha<sup>-1</sup> durant une saison de croissance (Neeteson 1995).

L'azote du sol se trouve essentiellement sous forme organique. L'atmosphère en contient 79 %; cependant, cet azote ne peut être utilisé que par les légumineuses via la fixation symbiotique. Selon Barber (1995), l'azote peut être classé en cinq catégories: (1) N de la matière organique, (2) N minéral dans la solution du sol et dans les sites d'échange, (3) N issu des résidus de plantes, (4) l'ammonium fixé sur les minéraux argileux et (5) N gazeux dans l'atmosphère. L'échange entre les différentes formes se fait via l'activité microbienne. Un schéma simplifié du cycle de l'N est présenté à la Figure 1.



**Figure 1** Cycle de l'azote (reproduit d'après Sims 1995).

Vu que les pertes d'N sont inévitables et que la minéralisation de N du sol est souvent insuffisante pour répondre aux besoins des plantes, la pratique courante consiste en un apport supplémentaire essentiellement via les engrais minéraux et organiques. Compte tenu de son coût élevé, la fertilisation azotée constitue une charge considérable dans la production agricole. Below (1995) a indiqué que la fertilisation azotée représente 80% du coût annuel de tous les fertilisants. Ainsi, la production mondiale annuelle de fertilisants azotés est d'environ  $79 \times 10^6$  Mg N (FAO 1995), alors que la consommation annuelle se situe aux alentours de  $73 \times 10^6$  Mg N (FAO 1995). Au Québec, environ 80 000 unités de N sont vendues annuellement (Tran 1996). L'urée et le nitrate d'ammonium sont les deux principales sources d'engrais azoté les plus utilisées au Québec. La gestion de la fertilisation azotée s'avère donc indispensable et s'inscrit dans le cadre d'une agriculture durable pour toute exploitation agricole visant à améliorer sa

rentabilité. Au Québec, la surfertilisation a été identifiée comme l'un des principaux facteurs de dégradation des sols agricoles (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 (Grimard 1990; Tran et al. 1992a).

### A. 2 Effet de l'azote sur la production de fourrages: rendement et qualité

L'azote est un élément essentiel pour la croissance et le développement de la plupart des plantes supérieures. Il constitue l'élément majeur le plus limitatif pour les graminées fourragères. C'est un constituant essentiel des protéines, des acides nucléiques et de la chlorophylle. Selon l'espèce végétale, le stade de croissance et l'organe, la concentration en N requise pour la croissance optimale varie entre 2 et 5% sur une base de matière sèche (Marchner 1995).

Les formes d'azote généralement absorbées par les plantes sont l'ammonium et le nitrate. Toutefois, le nitrate demeure la forme préférée par la majorité des plantes. L'ammonium est métabolisé dans les racines, alors que les nitrates peuvent être entreposés dans les racines, les tiges et les feuilles, particulièrement chez les plantes nitrophiles qui l'utilisent comme osmo-régulateur (Marchner 1995). Cependant, le prélèvement de l'azote par les espèces végétales reste relié aux conditions climatiques ainsi qu'à l'espèce étudiée. À égale quantité de nitrate et d'ammonium, la fétuque (*Festuca arundinacia* Schreb) et l'alpiste roseau (*Phalaris arundinacia* L.) absorbent 1,3 à 2,2 fois plus vite le  $\text{NH}_4^+$  que le  $\text{NO}_3^-$  (Barber 1995). Chez d'autres espèces telles que le maïs (*Zea mays* L.), il n'y a pas de préférence vis-à-vis l'absorption de ces deux formes d'azote. La température ainsi que le pH de la solution du sol influencent également le prélèvement de l'azote par les plantes sous forme de nitrate ou d'ammonium. Toutefois, cette influence reste trop variable et dépendante notamment de l'espèce elle-même (Barber 1995). Whitehead (1995) a rapporté que l'absorption des nitrates par le ray-grass pluriannuel (*Lolium perenne* L.) est maximale à un pH de 6,2 et augmente avec la température dans l'intervalle de 5 à 35°C. Par ailleurs, l'absorption de l'ammonium est maximale à une température de 22°C et elle est peu influencée par le pH du sol dans un intervalle de 4 à 7,5.

L'effet positif de la fertilisation azotée sur la croissance et la productivité des espèces fourragères est bien connu dans la littérature (St-Pierre et Pelletier 1977; Hunt et al. 1979). Cet effet est visible aussi bien sur le plan morphologique que physiologique. L'augmentation du rendement avec N est généralement attribuée à une augmentation du nombre de tiges. De plus, l'apport de N entraîne une amélioration de la qualité du fourrage produit se traduisant par une faible concentration des fibres extraites au détergent acide (ADF) et une forte concentration de protéines brutes. Dans une étude effectuée au Québec sur la fertilisation de la fléole, Guertin et al. (1979) ont démontré que le rendement en matière sèche (M.S.) augmente significativement avec chaque accroissement de la dose de N jusqu'à 448 kg N ha<sup>-1</sup>. Au delà de cette dose, le rendement diminue d'environ 1 Mg ha<sup>-1</sup>. Une étude récente effectuée au Nouveau-Brunswick par Bélanger et Richards (1997) a révélé que la croissance maximale des parties aériennes de la fléole des prés est obtenue avec des doses variant de 120 à 140 kg N ha<sup>-1</sup>.

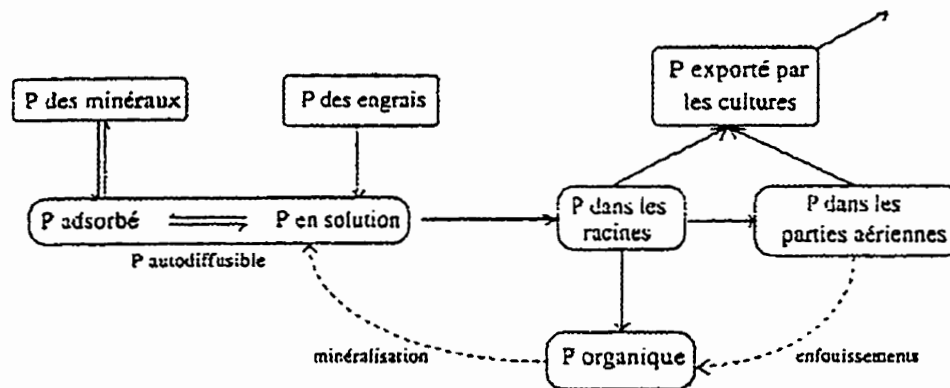
L'apport de N augmente également la teneur en N total des tissus végétaux. Des études effectuées en Europe ont mis en évidence la relation entre la teneur de fourrages en N et l'accumulation de la M.S. (Lemaire et Denoix 1987). Cette même approche a récemment été validée au Canada pour la fléole des prés (Bélanger et Richards 1997). L'augmentation de prélèvement de N est généralement accompagnée par une augmentation de l'absorption d'autres éléments nutritifs. Toutefois, des quantités élevées de N prélevé sous forme de nitrates peuvent devenir nocives pour les ruminants. Selon Ryan et al. (1972), le niveau maximum de N-NO<sub>3</sub> considéré sécuritaire dans les fourrages se situe à 1,5 g kg<sup>-1</sup> de M.S. À une teneur de 3 g kg<sup>-1</sup>, les fourrages deviennent dangereux, alors qu'à 6 g kg<sup>-1</sup>, les fourrages deviennent toxiques. Toutefois, la fléole des prés est une culture qui ne semble pas accumuler des quantités importantes de nitrates dans ses tissus (Kline et Broersma 1983).

Un surplus d'azote augmente le rapport tige/racine jusqu'à l'inhibition du développement racinaire qui, à des stades ultérieurs, pourrait devenir insuffisant pour approvisionner la plante en eau et en éléments nutritifs. L'excès d'azote augmente la longueur et la largeur des feuilles tout en réduisant leur épaisseur. Une déficience azotée, par contre, peut se traduire par une réduction de la photosynthèse, de la croissance, de la taille des cellules, de la teneur en protéine et de la taille et du nombre de chloroplastes (Sanderson et al. 1997).

## B. Phosphore

### B. 1 Principales sources de phosphore dans les agro-écosystèmes

Le phosphore existe dans les roches et les sols, le plus fréquemment sous formes de composés de types d'apatites  $\text{Ca}_4(\text{CaX})(\text{PO}_4)_3$  avec X pouvant être Cl, F, OH ou  $\text{CO}_3^{2-}$  (Robert 1996). Le P total se divise en deux fractions: soient le P inorganique (généralement lié aux Al, Fe et Ca) et le P organique. La figure 2 illustre les différentes parties du cycle de P.



**Figure 2** Cycle du phosphore (reproduite d'après Robert 1996).

Le phosphore est un élément essentiel au développement et à la croissance des plantes. Sa concentration dans le sol demeure faible comparée à d'autres éléments tels que l'azote, le potassium, le calcium et le magnésium (Barber 1995). Dans la solution du sol, la concentration maximale en P est estimée à  $4 \text{ kg P ha}^{-1}$ . Le P ajouté au sol sous forme d'engrais de ferme ou d'engrais minéraux se concentre généralement à la surface du sol où il sera rapidement retenu par les sites d'échange ou absorbé par la biomasse microbienne (Barber 1995).

Sachant que la richesse naturelle des sols en P est faible, des apports complémentaires sous forme d'engrais minéral ou organique sont effectués pour répondre aux besoins des

plantes. Selon la FAO (1995), la production mondiale annuelle d'engrais phosphaté est estimée à  $32 \times 10^6$  Mg  $P_2O_5$  contre une consommation annuelle estimée à  $29 \times 10^6$  Mg  $P_2O_5$ .

## **B. 2 Effet du phosphore sur la production du fourrage: rendement et qualité**

Le phosphore est principalement absorbé sous forme anionique  $H_2PO_4^-$ . Il est assimilé rapidement par la plante sous forme de phosphate inorganique (P- $PO_4$ ), de pyrophosphate (P- $P_2O_7$ ) ou de phosphate-ester/diester (C-O-P/C-P-C). Le phosphore entre dans la plante surtout par diffusion. Ainsi, la plante s'alimente essentiellement du P présent dans la solution du sol qui se renouvelle à partir des réserves de P labile (Simard et al. 1994).

Le phosphore, un élément constitutif des acides nucléiques et des phospho-lipides membranaires, joue un rôle primordial dans les transferts d'énergie. Un apport de P peut augmenter le prélèvement et l'utilisation de ce dernier en particulier en modifiant la morphologie des racines pouvant ainsi exploiter une plus grande surface du sol (Sanderson et al. 1997). Le contenu en P pour une croissance optimale des plantes varie de 0,3 à 0,5% sur une base de M.S. (Marchner 1995). Cependant, l'effet de P sur le rendement des fourrages, en particulier les graminées, est peu rapporté dans la littérature. Son importance est surtout attribuée à la persistance des espèces pluriannuelles, plus particulièrement les légumineuses (Grant et MacLean 1966; Bélanger et al. 1989; Sanderson et Jones 1993).

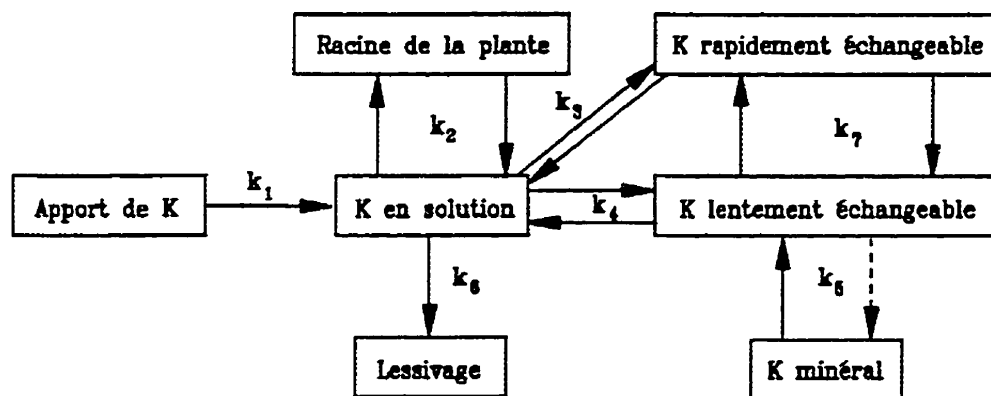
Une déficience phosphatée peut entraîner une réduction de la croissance, de la longévité et de la densité des plantes pluriannuelles (*ex*: la luzerne) (Sanderson et Jones 1993; Nelson et al. 1992). Un excès de P, par contre, peut être accompagné par une augmentation de fibres extraits au détergent acide (ADF) (Petit et al. 1992).

## **C. Potassium**

### **C.1 Principales sources du potassium dans les agro-écosystèmes**

Le contenu des sols en K total varie de quelques centaines de  $kg\ ha^{-1}$  à  $50\ 000\ kg\ ha^{-1}$  et plus dans les sols argileux dont le matériel original est riche en minéraux argileux tels que le feldspath et les micas. Le K du sol peut être classé en quatre catégories: (1) K de la solution du sol, (2) K échangeable; (3) K difficilement échangeable ou fixé et (4) K structural.

Les ions de K passent d'une catégorie à une autre aussitôt que l'équilibre est affecté par une addition ou une réduction de la teneur en K. Cependant, le taux d'équilibre dans chacun de ces pools est très variable. L'équilibre entre le K de la solution du sol et celui échangeable est très rapide et s'établit en quelques minutes. Par ailleurs, l'équilibre entre le K difficilement échangeable, le K de la solution du sol et le K rapidement échangeable est beaucoup plus lent et nécessite une période de quelques jours à plusieurs mois pour s'établir. Quant au K structural, sa formation est très lente et dépend du type de minéraux. La figure 3 montre la relation entre les différentes formes de K.



**Figure 3** Différentes formes de K dans le sol (reproduite d'après Simard et al. 1990).

### C. 2 Effet du potassium sur la production de fourrages: rendement et qualité

Les besoins des cultures en K occupent la deuxième place après ceux en azote. Ainsi, la production mondiale annuelle des engrais potassiques est estimée à  $20 \times 10^6$  Mg  $K_2O$  contre une consommation annuelle de  $18 \times 10^6$  Mg  $K_2O$  (FAO 1995). La plante prélève initialement le K de la solution du sol et des formes rapidement échangeables à un taux assez élevé. Une fois

ces sources épuisées, le prélèvement diminue considérablement puisque la plante puisera le K uniquement des formes lentement échangeables (Simard et al. 1990). L'équilibre entre ces différentes formes de K est assuré par le processus de diffusion et dépend de plusieurs facteurs, en particulier les caractéristiques physico-chimiques du sol (pH, composition minéralogique, capacité de fixation en K du sol, etc.). La quantité de K requise pour une croissance optimale des végétaux se situe entre 2 et 5% sur une base de M.S. (Marchner 1995). Le K est un élément essentiel pour le maintien de la productivité de certaines espèces fourragères, en particulier, les légumineuses (Lanyon et Smith 1985). Dionne et al. (1987) a rapporté une augmentation des rendements d'un mélange de luzerne-fléole des prés suite à des applications de K à des taux allant jusqu'à 260 kg de K<sub>2</sub>O à l'hectare.

Le potassium qui est un cation monovalent à faible énergie d'hydratation (0,3 kJ/mol) est prélevé par la plante de façon hautement sélective. Il possède une grande mobilité dans la plante. Sa contribution à l'osmo-régulation est majeure avec une concentration de 100 à 120 mM dans le cytoplasme. La présence de K est nécessaire pour neutraliser les anions organiques et inorganiques afin de maintenir le pH des cellules entre 7 et 8. Il stimule les ATPases et facilite ainsi son transport actif à travers la membrane cellulaire. Le potassium affecte la photosynthèse en contrebalançant le flux de protons à travers les membranes des thylakoïdes et en établissant un potentiel transmembranaire nécessaire à la synthèse d'ATP. Un excès de K a aussi un effet inhibiteur sur la synthèse d'amidon et de protéines. Une accumulation de K dans les cellules stabilise le pH du cytoplasme et augmente le potentiel osmotique des vacuoles. Par contre, une carence en K cause une diminution de la photosynthèse et de la translocation, entraîne une diminution de la synthèse d'amidon et des protéines, retarde la croissance et produit une chlorose des feuilles mûres, réduit la lignification et augmente les risques de verse chez les graminées (Lanyon et Smith 1985).

#### **D. Interactions entre les trois éléments majeurs : N, P et K**

L'importance de N, P et K pour la production des fourrages a été rapportée individuellement. Toutefois, l'interaction entre ces trois nutriments demeure d'une importance capitale pour une production maximale de fourrages (MacLeod 1965; Grant et Maclean 1966; MacLeod et MacLeod 1974). Une étude effectuée par Bélanger et al. (1989) a révélé qu'à



court terme, seuls le N et le K sont nécessaires pour assurer un maximum de rendement et de persistance de la fléole des prés. Toutefois, à long terme, la productivité dépend d'une application équilibrée de ces trois éléments alors que la persistance ne dépend que de la fumure potassique. L'interaction entre N et P a également été rapportée pour la fléole des prés. Dans une récente étude, Bélanger et Richards (1998) ont mis en évidence l'importance de la teneur optimale en P dans la fléole des prés pour la croissance des parties aériennes de cette espèce qui est fonction de leur teneur en N et du niveau de déficience azotée. La même approche a été utilisée pour d'autres éléments comme le P et le K (Salette et Huché 1991). L'utilisation du rapport P/N afin de détecter la nature de la déficience en nutriments au niveau des plantes a aussi été proposée par Koerselman et Meuleman (1996) dans les écosystèmes naturels des Pays-Bas et par Sinclair et al. (1997) dans un mélange de trèfle blanc et de ray-grass en Nouvelle-Zélande. Des résultats comparables montrant l'influence de N et de P et de leur interaction ont été rapportés pour des prairies permanentes cultivées en France (Salette et Huché 1991).

### 1.2.3 Comparaison entre quelques méthodes d'analyse du sol

Plusieurs méthodes ont été développées afin de prédire la disponibilité des différents éléments nutritifs aux plantes tant à court qu'à long terme. Vu la complexité du comportement de chacun des éléments dans le sol et le nombre élevé de facteurs pouvant influencer leur disponibilité ainsi que des considérations économiques et environnementales visant à maximiser la gestion de ces éléments, le développement des méthodes d'analyse de sol ne cesse d'accroître. L'évaluation de la disponibilité des éléments nutritifs est généralement rendue possible à l'aide d'analyses de sol qui demeurent le moyen le plus utilisé et probablement le plus efficace. À titre d'exemple, environ 3 à 3,5 millions d'échantillons de sol sont prélevés annuellement aux États-Unis pour être analysés (Skogley 1994). Selon Corey et Schulte (1973), le but de l'analyse de sol est d'étudier les facteurs pouvant influencer cette disponibilité et d'interpréter les résultats en vue d'apporter les corrections nécessaires. Malgré tous les efforts déployés, il reste toujours difficile de prédire avec précision la disponibilité des nutriments pour les plantes. Dans ce contexte, Skogley (1994) a rapporté que disposer d'une méthode parfaite d'analyse de sol demeure un rêve. Selon le même chercheur, un "test idéal d'analyse de sol" doit être à la fois: (1) universel, (2) standard, (3) précis, (4) simple, (5) non

dispendieux, (6) rapide et (7) sensible aux différents mécanismes (*ex*: diffusion) contrôlant la disponibilité des nutriments aux plantes. Jusqu'à présent, plusieurs méthodes d'analyse de sol ont été mises au point. Les méthodes les plus utilisées sont: extractifs chimiques, résines échangeuses d'ions; électro-ultrafiltration, marquage isotopique et études de cinétique. Pour les objectifs de cette étude, seules les trois premières méthodes seront discutées en détail.

### **1.2. 3.1 Extractifs chimiques**

L'utilisation d'extractifs chimiques est la méthode la plus répandue pour le dosage des éléments nutritifs dans le sol. En effet, elle reste la méthode la plus ancienne et la plus utilisée dans le domaine de la science du sol. Bien que la majorité des études effectuées dans ce domaine aient donné des résultats satisfaisants, quelques contradictions ont été rapportées dans la littérature. À titre d'exemple, Hartz (1994) a rapporté que la majorité des méthodes d'analyse de sol pour sa teneur en N ont été développées en laboratoire; ce qui nécessite le recours à des facteurs de correction pour convertir les résultats selon la méthode de référence. Même ces facteurs de correction diffèrent entre études et entre méthodes. Ces différences de résultats pourraient être expliquées par la diversité des facteurs pouvant influencer la disponibilité de cet élément, d'une part, et la forte sensibilité de ces méthodes, d'autre part. Bundy et Meisinger (1994) ainsi que Subler et al. (1995) ont également rapporté que les extractifs chimiques utilisés ne reflètent qu'imparfaitement la disponibilité réelle de N. En effet, ces méthodes ne tiennent pas compte de l'ensemble des facteurs pouvant influencer cette disponibilité. Des conclusions semblables ont été rapportées dans le cas du P (Yang et al. 1991; Cooperband et Logan 1994; Skogley et Dobermann 1996). Ainsi, les extractifs chimiques peuvent soit sous-estimer soit surestimer la quantité de P réellement disponible aux plantes et leur mode d'action et de sélectivité reste encore mal connu (Menon et al. 1989; Cooperband et Logan 1994).

Dans une récente revue de littérature, Skogley (1994) a relié les problèmes de méthodes d'analyse de sol à deux principales raisons: (1) les extractifs chimiques ne sont pas reliés de façon mécanistique aux nutriments disponibles aux plantes et (2) ces problèmes sont inhérents à la méthodologie elle-même utilisant des extractifs chimiques.

### 1.2.3.2 Utilisation des résines d'échanges ioniques

L'utilisation des résines d'échange pour le dosage des éléments nutritifs dans le sol est une méthode relativement ancienne. La première utilisation de cette méthode a servi au dosage du P dans le sol (Amer et al. 1955). À l'origine, les résines ont été utilisées sous forme de sacs ou de capsules. L'utilisation de ces résines a fourni une meilleure estimation de la disponibilité des nutriments que les extractifs chimiques surtout pour les sols forestiers (Gibson 1986; Skogley 1994). Toutefois, les études dans le domaine agricole sont encore limitées (Subler et al. 1995) et ont surtout concerné le dosage du phosphore (Tran et al. 1992b; Tran et al. 1992c). Jusqu'à présent, très peu d'études ont été faites pour le dosage des nitrates malgré l'importance de cette forme d'azote dans la nutrition minérale des cultures (Paré et al. 1995; Jowkin and Schoneau 1998).

L'utilisation des résines d'échanges ioniques a récemment réémergée et son emploi comme technique de dosage des éléments dans le sol devient de plus en plus répandu (Skogley et Dobermann 1996, Dobermann et al. 1997). Toutefois, c'est sous forme de membranes que ces résines sont de plus en plus utilisées vu les avantages que possèdent ces dernières par rapport aux autres formes de résines. À titre indicatif, les membranes dérangent moins le sol, offrent un meilleur contact avec le sol vu leur forme bidimensionnelle et tiennent compte du mécanisme de diffusion des éléments.

Les résultats des études effectuées jusqu'à présent ont démontré l'efficacité de cette méthode surtout pour le phosphore. C'est une méthode simple, rapide, efficace, non dispendieuse et constante pour une large gamme de sols de l'Ouest canadien (Qian et al. 1992). Plusieurs études ont rapporté de fortes corrélations entre les méthodes utilisant les résines et les extractifs chimiques (Qian et al. 1992; Cooperband et Logan 1994; Paré et al. 1995).

Les membranes d'échanges ioniques absorbent et accumulent les ions de la solution du sol par le biais des réactions d'échanges stochiométriques de la même manière que le système sol-racines. Les échanges impliquent la redistribution des ions de la solution du sol à la membrane par diffusion. Cette méthode tient compte à la fois de la concentration des éléments présents dans la solution du sol et de leur mouvement dans celle-ci. Ainsi, la

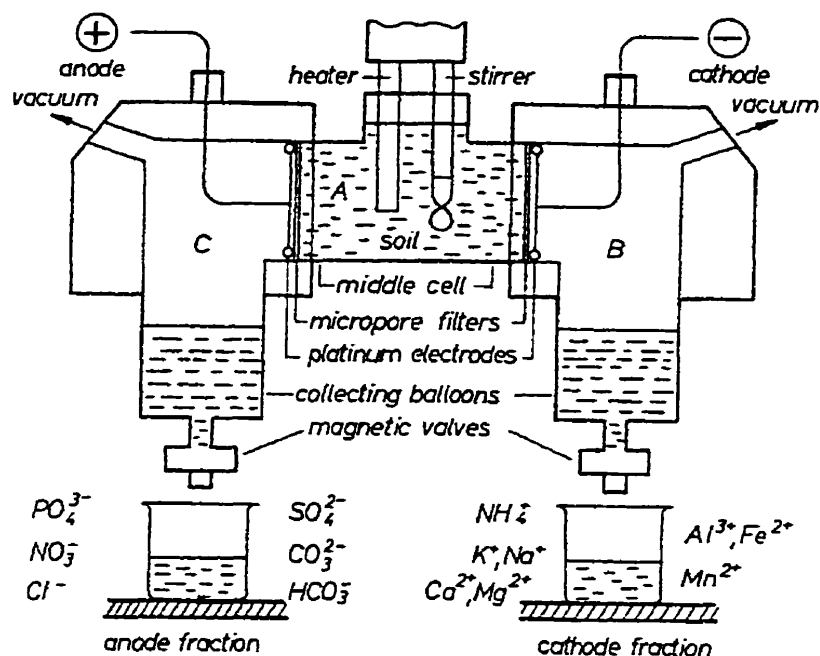
quantité d'ions adsorbés sur la membrane est fonction de leur concentration, de la capacité du sol à renouveler la solution du sol en ion visé et de la diffusion des ions. Jusqu'à présent l'utilisation des résines d'échanges ioniques est l'unique méthode d'analyse de sol qui tient compte du mécanisme de diffusion des nutriments; un tel mécanisme est très connu dans le domaine de la nutrition minérale des plantes (Barber 1995).

### **1. 2.3.3 Utilisation de la technique d'Électro-Ultrafiltration (EUF)**

#### **A. Aperçu sur la technique d'EUF**

Selon Németh (1979), la méthode d'EUF utilisée dans le domaine des sciences du sol a été mise au point par Bechold en 1925 suite à une combinaison de deux autres méthodes d'analyse de sol, soient l'ultrafiltration et l'électrodialyse. Le principe général de cette technique est d'appliquer un champ électrique à une suspension de sol. Ainsi, les anions ( $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ,  $\text{HPO}_4^{2-}$ , etc.) se trouvant dans la suspension du sol se déplacent vers l'anode et les cations ( $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ , etc.) peuvent être récupérés au niveau de la cathode. Le dosage de ces cations et anions peut par la suite être effectué par les méthodes conventionnelles. Les principaux avantages de cette technique sont: (1) méthode douce (extraction dans l'eau), (2) peut extraire à la fois plus d'une forme d'un même élément (*ex*: K en solution, K échangeable, K non-échangeable), (3) extraire simultanément plusieurs éléments et (4) facilite les études de cinétique.

L'appareil de l'EUF comporte trois parties essentielles pour assurer l'extraction des cations et des anions. La cellule du milieu contient la suspension du sol. Elle est reliée à deux autres cellules munie chacune d'un filtre micropore et liée à un vacuum. La figure 4 illustre en détail les différentes parties de l'appareil.



**Figure 4** Appareil de l'Électro-ultrafiltration (reproduite d'après Németh 1979).

La technique d'EUF est surtout utilisée en Europe et en Asie, alors qu'elle est moins exploitée en Amérique du Nord (Tran et al 1987; Tran et al. 1992b; Simard et Tran 1993). Plusieurs études ont été effectuées dans les années 70 pour définir les différentes fractions des éléments dosés par EUF (Németh 1985). Une de ces fractions est liée à la concentration des éléments dans la solution du sol d'où ils sont généralement prélevés par les plantes. Différents voltages (50, 200 et 400 V), températures (20 et 80°C) et temps de lecture (10, 30 et 35 min) ont été testés. D'une façon générale, la fraction obtenue après 10 min, à 200 V et 20°C correspond à la concentration de l'élément étudié dans la solution du sol à la capacité au champ (Németh 1985).

### **B. Extraction du phosphore par EUF**

La technique d'EUF permet de prédire la disponibilité de P pour les plantes à court et à long termes (Németh 1979). Des études effectuées sur la désorption du P par EUF par Németh (1982; 1985) ont démontré que la quantité de P facilement disponible aux plantes

peut être estimée à partir de la fraction de P dosée par EUF après 30 min à 20°C et 200 V (EUF-P-20°C). Par ailleurs, la fraction de P dosée par EUF après 35 min à 80°C et 400 V (EUF-P-80°C) caractérise les réserves du sol en P. Des valeurs de EUF-P-20°C variant entre 1,25 et 2,25 mg/100 g ont par ailleurs été suggérées comme seuil limite pour une nutrition optimale des plantes (Németh 1985). De fortes corrélations entre le EUF-P-20°C et le P extrait à l'eau ont été rapportées dans la littérature (Taha et al.1982; Simard et Tran 1993). En 1985, Németh a proposé un rapport (EUF-P<sub>Q</sub>) permettant de mieux prédire les besoins en engrais phosphatés en tenant compte à la fois de la fraction facilement disponible et du réserve en P. Ce rapport défini comme  $P_Q = (\text{EUF-P-80}^\circ\text{C})/(\text{EUF-P-20}^\circ\text{C})$  a été utilisé avec succès lors de l'établissement des recommandations des engrais phosphatés, en particulier pour la betterave à sucre. Dans les sols alcalins, P<sub>Q</sub> est supérieur à l'unité alors que dans les sols acides à neutres, P<sub>Q</sub> peut prendre des valeurs entre 0,3 et 0,6 puisque EUF-P-20°C récupère tous les ions phosphatés présents dans la solution du sol. Cette hypothèse a été confirmée un peu plus tard par Simard et Tran (1993) quoique les valeurs de P<sub>Q</sub> étaient plus élevées dans cette étude que les valeurs proposées par Németh (1985).

Simard et Tran (1993) furent les premiers en Amérique du Nord à avoir testé la technique d'EUF pour doser le P et ce sur 34 sols du Québec. Ils ont comparé l'EUF à d'autres techniques, notamment les méthodes chimiques, pour prédire la disponibilité de P ainsi que la réponse de l'avoine (*Avena sativa* L.) et du maïs (*Zea mays* L.) à un fertilisant phosphaté. Leur étude a révélé une forte corrélation entre le P extrait par EUF et le P prélevé par les deux espèces cultivées en serre. De plus, ils ont rapporté une forte corrélation entre le EUF-P et le P extrait au NaHCO<sub>3</sub> 0,5 M à pH 8,5. Pour sa part, Steffens (1994) a utilisé la technique d'EUF pour étudier la cinétique de désorption de P dans 15 sols européens ayant reçus différents types de fertilisants phosphatés. Son étude a révélé de fortes corrélations entre le P prélevé par différentes plantes et le P dosé par EUF. Ces résultats corroborent d'autres travaux de recherche rapportés dans la littérature (Németh 1985; Simard et Tran 1993).

### C. Extraction du potassium par EUF

La technique d'EUF a aussi été utilisée pour estimer la disponibilité du K à court et à long termes. Selon Németh (1985), la quantité de K facilement disponible pour la plante correspond aux fractions extraites par EUF à 20°C avec des potentiels de 50 et 200 V alors que la fraction de K extraite à 80°C avec un potentiel de 400 V caractérise la réserve du sol en K. Németh (1985) a proposé un rapport (EUF-K<sub>Q</sub>) des fractions de K obtenues par EUF afin de mieux interpréter les résultats. EUF-K<sub>Q</sub> est le rapport de la quantité de K extraite à 400 V (80°C) à celle extraite à 50 et 200 V (20°C). Ce rapport dépend de la teneur du sol en argile. Ainsi, des valeurs inférieures à 0,60 ont été rapportées pour les sols dont la teneur en argile varie entre 15 et 35%, alors que dans les sols argileux (moyennement riches en K échangeable), ce rapport est supérieur à l'unité. Simard et al. (1990) ont indiqué que le K extrait par EUF constitue une meilleure évaluation de la disponibilité de cet élément dans les sols du Québec. Tran et al. (1987) ont estimé le niveau de fertilité en K de 60 sols du Québec en utilisant à la fois EUF et les extractifs chimiques. Cette étude a révélé que la quantité de K extraite par EUF à 50 V est comparable à celle extraite au CaCl<sub>2</sub> (0,01 M) alors que le K-EUF (50 + 200 + 400 V) est comparable au K extrait à l'acétate d'ammonium.

### 1. 3 HYPOTHÈSES

Suite à cette revue de littérature, les hypothèses suivantes ont été formulées:

- (1) Les recommandations de la fertilisation minérale des fourrages actuellement rapportées dans le CPVQ ne sont pas applicables pour les conditions de l'Abitibi-Témiscamingue;
- (2) Les méthodes utilisées pour déterminer des besoins en éléments fertilisants ne sont pas adaptées aux sols de la région de l'Abitibi-Témiscamingue;
- (3) Les besoins en N des prairies fourragères à base de fléole de prés produites en Abitibi-Témiscamingue sont plus élevés que ceux recommandés pour le reste de la province de Québec;

- (4) Les besoins en P et K des fourrages produits en Abitibi-Témiscamingue sont plus faibles que ceux produits dans le reste de la province de Québec;
- (5) L'utilisation des résines d'échange est une méthode plus spécifique et plus précise que les extractifs chimiques;
- (6) L'utilisation de la technique d'EUF permet de mieux caractériser les sols de l'Abitibi-Témiscamingue que les extractifs chimiques, plus particulièrement, leur richesse naturelle en P et en K.

#### **1.4 OBJECTIFS**

L'objectif général de cette étude était d'évaluer, sous les conditions pédoclimatiques de la région de l'Abitibi-Témiscamingue, les besoins en N, P et K des prairies à base de graminées, en particulier, celles à base de fléole des prés.

Les objectifs spécifiques sont:

- (1) Quantifier l'effet de N, P et K sur le rendement des fourrages produits dans la région de l'Abitibi-Témiscamingue;
- (2) Comparer quelques méthodes d'analyse du sol pour mieux prédire la disponibilité de chacun des éléments aux fourrages. Une attention particulière sera accordée à la disponibilité en N et ce pour faire la mise au point d'une nouvelle technique de dosage des nitrates dans le sol;
- (3) Étudier la cinétique de désorption de P et de K par la technique d'Électro-ultrafiltration.



# CHAPITRE II

## MATÉRIEL ET MÉTHODES

Les différents objectifs de recherche envisagés dans cette étude ont été atteints à partir d'expériences effectuées au champ en Abitibi-Témiscamingue. À cet effet, il a été jugé nécessaire de présenter le matériel en détails dans ce chapitre. Pour la mise au point de la méthode de dosage des nitrates par AEMs, une série d'essais a été menée au laboratoire en 1994 avant de conduire les essais au champ en 1995 et 1996. Suite aux résultats obtenus au champ après trois années d'expérimentation, des études complémentaires ont été effectuées en utilisant la technique d'EUF afin de caractériser les sols à l'étude pour leur teneur en P et en K.

### 2. 1 EXPÉRIMENTATION AU CHAMP

Les expériences se sont déroulées sur trois années, soit de 1994 à 1996. Quatre réseaux de 60 parcelles chacun ont été établis au printemps 1994 chez les producteurs de la région de l'Abitibi-Témiscamingue. Ce sont des prairies de graminées implantées entre 1990 et 1992. Quatre sites ont été choisis chez des producteurs de la région dont deux situés dans la région de l'Abitibi, soient les sites de Ste-Gertrude (site 1) près d'Amos (Abitibi-Est) et le site de Palmarolle (site 2) près de Lasarre (Abitibi-Ouest). Le site de Ste-Gertrude est le seul site dont la principale plante fourragère est le dactyle au lieu de la fléole des prés. Les sols de ces sites sont des argiles brun-calcaire. Les deux autres sites étaient situés dans la région du Témiscamingue où les sols sont des argiles gris-calcaire. Ce sont les sites de Laverlochère (site 3) et de Lorrainville (site 4) qui sont situés près de Ville-Marie. Le tableau 2.1 présente des données historiques fournies par les propriétaires des sites.

**Tableau 2.1** Quelques informations relatives aux sites expérimentaux

Sites	Ste-Gertrude	Palmarolle	Laverlochère	Lorrainville
<b>Date de semis</b>	1990	1991	1992	1990
<b>Espèces Présentes</b>	80% dactyle + 20% trèfle	55% trèfle + 45% mil	mélange B*	50% mil + 20% trèfle + 25% luzerne
<b>Fumier</b>	40 Mg ha <sup>-1</sup> en 1989	40 Mg ha <sup>-1</sup> en 1989	1990 (inconnu)	206 hL ha <sup>-1</sup> de lisier

\* = 55% mil + 30% trèfle rouge + 15% trèfle alsike.

Un premier échantillonnage du sol visant à définir les propriétés physico-chimiques des différents sites a eu lieu à l'automne 1993. La délimitation des parcelles a eu lieu au cours du mois de mai 1994. Les parcelles avaient une dimension de 12 m<sup>2</sup> (3 x 4 m) avec un espacement d'au moins un mètre entre les différents blocs.

Le dispositif expérimental était en bloc complètement aléatoire avec quatre répétitions. L'azote a été apporté sous forme de nitrate d'ammonium (34-0-0) selon les doses suivantes: 0, 60, 120, 180 et 240 kg N ha<sup>-1</sup>. Le phosphore a été apporté sous forme de superphosphate triple (0-46-0) selon les doses suivantes: 0, 30, 60, 90 et 120 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>. Quant au potassium, il a été apporté sous forme de muriate de potasse (0-0-60) selon les doses: 0, 50, 100, 150 et 200 kg K<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup>. Pour chaque traitement, un apport supplémentaire des deux autres éléments non-impliqués dans le traitement a été effectué à une dose équivalente au besoin de la culture selon le CPVQ (CPVQ 1994). Le tableau 2.2 montre les différents apports supplémentaires pour chaque site représentant ainsi les recommandations du CPVQ pour les plantes fourragères. L'épandage des fertilisants a été effectué à deux reprises, soit 50% au printemps et 50% après la première coupe au cours de chaque année de l'expérience. Ces fertilisants ont été manuellement épandus à la surface du sol. Pour chaque année, l'échantillonnage du sol a été fait à trois ou quatre reprises soit au printemps, à chaque coupe ainsi qu'à l'automne. Plus de détails sont fournis dans les chapitres relatifs aux résultats. Les profondeurs d'échantillonnage étaient: 0-15, 15-30 et 30-60 cm. Un régime de deux coupes a été appliqué pour l'ensemble des sites. Le stade de coupe était début épiaison pour les graminées et début floraison pour les

légumineuses. La récolte des fourrages a été effectuée dans chaque parcelle. Un échantillon de 500 g de fourrage a été prélevé pour des fins d'analyse et de détermination du rendement en M.S.

**Tableau 2.2** Recommandations de la fertilisation minérale des sites expérimentaux selon le CPVQ (CPVQ 1994)

Site	N (kg ha <sup>-1</sup> )	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (kg ha <sup>-1</sup> )	K <sub>2</sub> O (kg ha <sup>-1</sup> )
Ste-Gertrude	110	60	15
Palmarolle	110	50	50
Laverlochère	110	40	0
Lorrainville	110	50	0

## 2.2 ANALYSES EFFECTUÉES

### 2.2.1 Analyse du sol

Avant le début de l'expérience, les sols ont été caractérisés à partir de l'échantillonnage de l'automne 1993 pour leur teneur en N, P, K Ca, Mg, Zn, Mn, Cu et B. Le pH à l'eau, l'analyse granulométrique (Sheldrick et Wang 1993) et la teneur en matière organique (Tiessen et Moir 1993) ont également été effectués. La teneur en azote total a été déterminée par la méthode de Kjeldahl (Bremner et Mulvaney 1982) alors que la teneur pour les autres éléments a été effectuée par la méthode de Mehlich 3 telle que décrite par Tran et Simard (1993).

Durant les trois saisons de croissance un suivi de l'azote dans les sol (nitrates et ammonium) a été effectué à chaque date d'échantillonnage. les nitrates et l'ammonium ont été extraits à l'eau (Keeney et Nelson 1982). L'ammonium a été dosé par colorimétrie et les nitrates par chromatographie en phase liquide et détection dans l'ultraviolet à 214 nm (Dionex 1987). En plus de l'extraction à l'eau, les nitrates ont été dosés par la méthode des AEMs dont les détails seront fournis à la section relative à la mise au point de cette méthode (section 2.3). La teneur du sol en P et en K a été déterminée au début et à la fin de l'expérience par la méthode Mehlich 3 (Tran et Simard 1993). Suite aux résultats obtenus aux champs, la cinétique de désorption du P et de K a été étudiée à l'aide de la technique d'EUF. De plus, quelques méthodes chimiques ont été utilisées pour extraire le P et le K pour des fins de comparaison avec l'EUF. Les détails de ces méthodes sont rapportés aux chapitres V et VI, respectivement.

### **2.2.2 Analyse des plantes**

Durant les trois saisons végétatives (1994-1996), un régime de deux coupes par saison a été appliqué. Les fourrages ont été coupés à une hauteur de 6 cm pour l'ensemble des sites et le rendement par coupe a été estimé à l'aide de quadrat de 60 x 30 cm. Les plantes ont été analysées pour leur teneur en N, P et K digestion humide dans un mélange d'acide sulfurique-acide sélénieux-peroxyde (Richards 1993). Les nitrates ont été extraits à l'eau (Cataldo et al. 1975). L'azote, le  $\text{NO}_3^-$  et le P ont été dosés par colorimétrie tandis que le K a été dosé par absorption atomique.

## **2.3 MISE AU POINT DE LA MÉTHODE DE DOSAGE DES NITRATES PAR LES MEMBRANES D'ÉCHANGE ANIONIQUE (AEMs)**

### **2.3.1 Caractéristiques des membranes utilisées**

Les membranes utilisées dans cette expérience ont été acquises sous forme de feuilles de 45,72 cm x 101,6 cm (Ionics, Inc., Watertown, M. A.). Ces membranes (type AR 204) sont hautement sélectives pour les anions. Elles sont fabriquées en polymère acrylique et ont les caractéristiques suivantes:

- Poids spécifique: 13,7 mg/cm<sup>2</sup>;
- Épaisseur: 0,5 mm;
- Teneur en eau: 46% de la résine humide;
- Capacité d'échange anionique: 2,40 meq/g de résine sèche.

### **2.3.2. Essais en laboratoire**

#### **2.3.2.1 Saturation des membranes**

Les membranes ont été coupées en bandes de 6,25 x 2,5 cm. La forme rectangulaire a été choisie afin de faciliter leur manipulation dans des tubes à centrifugation de 30 mL. Ces bandes ont été lavées avec de l'eau distillée pour enlever les impuretés puis conditionnées pendant au moins cinq minutes avec du HCl (0,5 M). Pour des fins de saturation avec du  $\text{Cl}^-$ , les bandes découpées ont été préalablement lavées à l'eau distillée, puis avec du NaCl (1M) pendant cinq minutes. Par la suite, elles ont été agitées pendant une heure dans du NaCl (1M). Les bandes ainsi saturées et prêtes à être utilisées ont été laissées tremper dans de l'eau distillée jusqu'au moment de leur utilisation. La saturation en  $\text{Cl}^-$  de ces membranes a généralement été

effectuée moins de 48 heures avant leur utilisation.

### **2.3.2.2 Expériences au champ**

Ces expériences ont été conduites sur les sites établis en Abitibi-Témiscamingue durant deux saisons végétatives successives, soit en 1995 et 1996. Les bandes saturées de CI (section 2.3.2.1) ont été transportées au champ dans de l'eau distillée pour les placer uniquement dans les parcelles des traitements d'azote. Les bandes (trois par parcelle) ont été placées à une profondeur de 15 cm en ouvrant le sol délicatement avec une pelle. Elles ont par la suite été recouvertes de sol tout en assurant un contact uniforme entre la membrane et le sol. Trois répétitions ont été envisagées pour un total de 240 bandes sur l'ensemble des sites. Les membranes ont été récupérées du champ au moment de l'échantillonnage du sol. Elles ont été lavées avec de l'eau distillée puis remises individuellement dans des tubes à centrifugation contenant 25 ml de NaCl (1 M). À chaque date d'échantillonnage, les membranes ont été remplacées par d'autres similaires en procédant de la même manière pour les récupérer à la prochaine date à l'exception de la dernière date d'échantillonnage à l'automne 1996. En laboratoire, les tubes ont été agités durant une heure puis la solution a été filtrée et dosée pour sa teneur en nitrates. Pour s'assurer de la désorption totale des nitrates des membranes, une deuxième agitation suivie d'un dosage ont de nouveau été effectués. En 1996, une seule agitation et un seul dosage ont été effectués à chaque date d'échantillonnage puisque les résultats de 1995 ont démontré que les nitrates peuvent être désorbés en une seule extraction.

## **2.4 UTILISATION DE LA TECHNIQUE D'EUF**

La série d'expériences relative à la technique d'EUF a été réalisée dans les laboratoires du service des sols du Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ) à l'aide de l'appareil de l'Électro-Ultrafiltration. Tous les détails sont soigneusement décrits dans les sections présentant les résultats de cette étude, soit les chapitres V, VI et VII.

## **CHAPITRE III**

**ÉVALUATION AU CHAMP DES MEMBRANES D'ÉCHANGE ANIONIQUE  
COMME MÉTHODE D'ANALYSE DE SOL POUR L'AZOTE SOUS PRAIRIES**

## RÉSUMÉ

L'utilisation *in situ* des membranes d'échange anionique (AEMs) comme méthode d'analyse de sol peut résulter en une évaluation plus précise de la disponibilité de N que les méthodes standards. L'objectif principal de cette étude était d'évaluer le potentiel des AEMs à mesurer la disponibilité des  $\text{NO}_3\text{-N}$  pour les fourrages produits dans l'ouest de la province de Québec, Canada. Durant 1995 et 1996, les AEMs ont été enfouies (0-15 cm) dans le sol de quatre sites. Les traitements consistaient en cinq doses de  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  (0, 60, 120, 180 et 240 kg N  $\text{ha}^{-1}$ ). À tous les sites, le  $\text{NO}_3^-$  adsorbé sur les AEMs a augmenté avec l'augmentation des doses de N. Les nitrates adsorbés aux AEMs sont significativement corrélés à ceux extraits à l'eau ( $R^2$  varie de 0,35 à 0,98) durant les deux saisons de croissance. Le prélèvement en N est plus fortement corrélé aux nitrates adsorbés aux AEMs ( $R^2 = 0,88$  et 0,92 au printemps 1996 et 1995 respectivement) qu'aux nitrates solubles à l'eau ( $R^2 = 0,39$  et 0,97 au printemps 1996 et 1995 respectivement). En se basant sur leur simplicité, leur rapidité et leur coût peu élevé, les AEMs sont plus avantageuses sur le plan pratique et supérieures en ce qui a trait à la prédiction de la disponibilité de l'azote que l'extraction à l'eau.

**Mots clés:** Résine, azote, prélèvement d'azote, fourrage, minéralisation de N

**Titre abrégé:** Disponibilité de l'azote en utilisant les résines

**Auteurs:** N. Ziadi, R. R. Simard, G. Allard et J. Lafond.

Accepté pour publication dans la revue canadienne de la science du sol.

**Field evaluation of anion exchange membranes as a N soil testing method for  
grasslands**

**ABSTRACT**

The *in situ* use of Anion Exchange Membranes (AEMs) as a soil testing procedure may provide a more precise evaluation of N availability to forages than standard methods. The main objective of this study was to evaluate the potential of AEMs to predict soil NO<sub>3</sub>-N availability for forage production in the western part of the province of Quebec, Canada. In 1995 and 1996, AEMs were buried (0-15 cm) in soils at four sites. Fertilizer treatments consisted of five NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> rates (0, 60, 120, 180, and 240 kg N ha<sup>-1</sup>). At all sites, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> sorbed on the AEMs (NO<sub>3AEMs</sub>) increased with increasing N fertilizer rates. The NO<sub>3AEMs</sub> fluxes were significantly related to water soluble NO<sub>3</sub>-N (NO<sub>3w</sub>) concentration in soil (R<sup>2</sup> varied from 0.35 to 0.98) in the two growing seasons. Forage N uptake was better related with NO<sub>3AEMs</sub> fluxes (R<sup>2</sup> = 0.88 and 0.92 in spring 1996 and 1995, respectively) than with NO<sub>3w</sub> concentration (R<sup>2</sup> = 0.39 and 0.97 in spring 1996 and 1995, respectively). Based on its simplicity, rapidity, and low cost, AEMs have many practical advantages over water NO<sub>3</sub>-N extraction for assessing grass forage soil N availability under cool continental climates.

**Key words:** Resin, nitrogen, N uptake, grass, N mineralization

**Short title:** Anion membranes as N soil testing



## INTRODUCTION

In the past few years, numerous methods have been developed to estimate soil N availability to crops. Although such methods, mainly based on chemical extraction and laboratory or field incubations, have proved useful, a major limitation remains in that they provide only an index of true nutrient availability (Yang et al. 1991; Skogley 1994; Skogley and Dobermann 1996). In addition, these methods are commonly time-consuming and expensive (Binkley and Matson 1983). The chemical products used for extraction are not always well understood in terms of their mode of action and selectivity (Cooperband and Logan 1994). Bundy and Meisinger (1994) reported that chemical extraction methods were likely to be unreliable because of the difficulty in reproducing soil microbial processes. In a recent study, Subler et al. (1995) indicated that only a few methods could provide an appropriate integrative measurement of soil N availability over time scales relevant to ecosystem functions such as the growing season.

As an alternative to chemical extraction, several studies attempted to monitor nutrient dynamics under field conditions using resin-filled nylon bags or capsules (Gibson 1986; Dobermann et al. 1997). These methods appeared to provide a better index of plant nutrient availability in forest and deserts than chemical extractions. However, the use of these methods in agronomic studies is still limited (Subler et al. 1995). In addition, most of the work using anion exchange resin was aimed to estimate available P (Amer et al. 1955; Sagggar et al. 1990; Schoenau and Huang 1991; Cooperband and Logan 1994). Little information is therefore available on the use of this technique to monitor soil N availability (Subler et al. 1995; Qian et al. 1992).

The *in situ* use of ion-exchange materials such as Anion-Exchange Membranes (AEMs) is another alternative. A growing body of evidence indicates that this technique has the potential to provide more precise indices of soil nutrient availability than chemical extractions (Cooperband and Logan 1994; Qian and Schoneau 1995). AEMs accumulate nutrients from soils through exchange reactions by a similar mechanism to the soil-root system (Yang et al. 1991). Furthermore, AEMs measures both solution concentration of

nutrients and their rates of movement through the soil. Compared to the ion resins (bags or capsules), AEMs create less disturbance, ensure a complete contact with the soil matrix because they are flat, and reduce diffusion errors associated with irregular contact between soil and resin (Vaidyanthan and Nye 1966).

In western Quebec, where forage grass is the main crop, both soil conditions and climate are very different from other parts of the province (Dubé et al. 1982). Soils of this area have recently been brought into cultivation and are not yet well studied (Simard et al. 1989). Nitrogen mineralization is limited in spring by very cool temperatures. Under these cool climatic conditions, the AEMs may provide useful tools for monitoring *in situ* soil N mineralization. To our knowledge, only few studies have been conducted in Canada using this technique, especially for N (Jowkin and Schoneau 1998; Qian and Schoneau 1995). The objectives of the present study were: (i) to assess the ability of AEMs to detect differences between mineral N fertilizer treatments applied to forage grass, (ii) to relate  $\text{NO}_3\text{-N}$  fluxes adsorbed on AEMs to water soluble  $\text{NO}_3\text{-N}$  concentration, and (iii) to develop a reliable *in situ* method of estimating soil N availability to forage grass.

## MATERIALS AND METHODS

### Soil Characteristics

Field experiments were conducted at four sites in 1995 and 1996 in the Abitibi-Temiscamingue region, province of Quebec, Canada. The soils (Humic Gleysols) are developed from fine textured glacio-lacustrine deposits, and have high clay and organic matter contents especially for the Laverlochere site (Table 1). They were cleared from the forest in the 1940's and have been infrequently plowed since (Rompré and Carrier 1997).

### Determination of Soil Properties

Soil pH was measured in distilled water with a 1:2 soil: solution ratio. Organic matter content was determined by wet oxidation (Tiessen and Moir 1993). Total N was measured by the micro-Kjeldahl method (Bremner and Mulvaney 1982). Particle size analysis was carried out by the hydrometer method after organic matter oxidation

(Sheldrick and Wang 1993). Cation Exchange Capacity (CEC) was determined with 1M  $\text{NH}_4\text{OAc}$  at pH 7 and a soil: solution ratio of 12: 5 (Hendershot et al. 1993). The amounts of Mehlich III extractable nutrients were determined according to Tran and Simard (1993). The P concentration in the extracts was measured by colorimetry whereas the K, Ca and Mg concentrations were determined by flame (K) and atomic absorption (Ca, Mg) spectroscopy .

### **Field Experiments**

Sites were chosen in 1993 from farmer's fields. Timothy (*Phleum pratense* L.) was the dominant grass species except at Ste-Gertrude where orchard grass (*Dactylis glomerata* L.) dominated. The treatments consisted of  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  applied at 0, 60, 120, 180, and 240 kg N  $\text{ha}^{-1}$  and are referred in the text as N0 to N240. A randomized complete block design with four replicates was used. Plot size was 4 m x 3 m. Fertilizers were broadcast by hand; half of the amount was applied in early spring and the other half after the first harvest (Table 2). The P and K fertilizers were applied according to the Mehlich III soil test and local recommendations (Conseil des Productions Végétales du Québec 1994).

The forage was harvested twice a yr from a 1.8  $\text{m}^2$  area of each plot using a plot harvester at a cutting height of 6 cm. A 500 g sub-sample was dried at 55°C in a forced draft oven for 3 d for dry matter (DM) determination. The sub-sample was ground to pass a 1 mm screen in a Wiley mill. The total N concentration was determined by colorimetry following a wet digestion with  $\text{H}_2\text{O}_2$  and  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (Richards 1993). Nitrogen uptake was calculated by multiplying forage DM yield by its N concentration. The seasonal N uptake was obtained by adding N uptake of the two harvests. Seasonal forage DM yield was calculated by adding yields from the two cuts.

### **Field Evaluation of AEMs**

Composite soil samples (0-15 cm layer, 10 cores per plot) were taken four times in 1995 and three times in 1996 to measure water soluble  $\text{NO}_3\text{-N}$  concentration. Details on soil sampling, AEMs recovery and plot management are presented in Table 2 for the Ste-

Gertrude site. The same sampling procedure for the other sites was carried out within three days. For all sampling dates, soil samples were frozen until analysis. Moisture content was measured after oven drying at 105°C for 24 h (Topp 1993). Since  $\text{NO}_3^-$  is the dominant form of mineral N present in agricultural soils (Liang and MacKenzie 1994; Whitehead 1995a), nitrification is rapid under our conditions, and grasses absorb almost all their N as nitrate (Whitehead 1995b), only nitrate was measured in the present study. The soil  $\text{NO}_3\text{-N}$  content was measured by extraction in distilled water ( $\text{NO}_{3\text{w}}$ ) with a 1:2 soil: solution ratio. Soil suspensions were agitated for 30 minutes on a reciprocating shaker and then centrifugated at 15 000 rpm and filtered through Whatman no 42 filter paper. The  $\text{NO}_3\text{-N}$  in the extracts was measured using a Dionex 4000i liquid chromatograph equipped with Ion Pack CG5 and CS5 columns. The content of  $\text{NO}_3\text{-N}$  was detected at 214 nm on a variable wavelength VDM-2 UV detector (Dionex Corp., Sunnyvale, CA). Because soil  $\text{NO}_3\text{-N}$  is primarily in a soluble form, water was used as an extractant to determine  $\text{NO}_3\text{-N}$  availability in this study. In addition quantities of  $\text{NO}_3\text{-N}$  removed by water and salt extractants are not significantly different and water is considered as a standard method for inorganic N and has proven successful in many laboratories (Allen et al. 1994; Gagnon et al. 1997; Gagnon et al. 1998).

Membranes used in this study (type AR 204, Ionics, Watertown, MA) are anion compressing cross-linked copolymers of vinyl monomers and contain quaternary ammonium anion exchange groups. These membranes have a specific weight of 13.7 mg  $\text{cm}^{-2}$ , a thickness of 0.57 mm, a water content of 40% of wet resin, and a minimum anion exchange capacity of 2.80 meq/g dry resin. They have a strong ability to exclude cations and a high resistance to contamination by organic materials. The AEMs were prepared by cutting a sheet of membrane into 6.25 cm x 2.25 cm strips. This shape was selected to facilitate the recovery by tweezers from the 30 mL centrifuge tubes used for extraction and elution. Strips were prepared by washing with distilled water to remove impurities and lightweight particles. The strips were conditioned by successively washing in 0.5 M HCl and 1 M NaCl. Finally,  $\text{Cl}^-$  saturation was achieved by shaking the strips for 1 h in 1 M NaCl. A fishing line was sewn to each strip to facilitate their recovery from the soils.

Prepared strips were carried to the field in water to avoid desiccation and were placed in the surface soil (0-15 cm) through a slice opened gently with a shovel. One strip was placed vertically into each slice and was attached with the fishing line to a coloured flag to facilitate its retrieval. The soil was immediately put in contact with the membrane by gentle pressure with the sampler's foot. Vertical placement of AEMs may ensure a control of the depth of soil that contribute to the  $\text{NO}_{3\text{AEMs}}$  fluxes. Membranes (three per plot) were collected according to the pre-planned calendar (Table 2) and then replaced by similar membranes placed at different randomized locations within the plots after each contact period. Collected strips were first washed with water in the field to remove adhering soil particles and placed in individual tubes containing 25 mL 1 M NaCl. In laboratory, the tubes were shaken for 1 h, filtered through Whatman no.42 filters and analysed for  $\text{NO}_3\text{-N}$  ( $\text{NO}_{3\text{AEMs}}$ ) as described above. After each contact period, soil nitrate fluxes measured by AEMs ( $\text{NO}_{3\text{AEMs}}$ ) were reported in  $\mu\text{g cm}^{-2} \text{d}^{-1}$  by dividing the  $\text{NO}_3$  concentration ( $\mu\text{g}$ ) by two times the membrane surface (*i.e.*  $2 \times 6.25 \times 2.25 \text{ cm}$ ) and by the length of AEMs contact with soil expressed in days (Table 2).

To evaluate the fall and winter N mineralization and the capacity of AEMs to act as a sink for N, AEMs were placed in soil on 26 September 1995 by the same procedure and left for a contact period of 240 d. They were collected on 22 May 1996 and  $\text{NO}_{3\text{AEMs}}$  was determined as described above.

### Statistical Analyses

Analysis of variance (ANOVA) on the effects of N fertilizer on N uptake,  $\text{NO}_{3\text{w}}$  and  $\text{NO}_{3\text{AEMs}}$  was performed using the GLM procedure of SAS (SAS Institute, Inc. 1990). During the two growing seasons and at each sampling date,  $\text{NO}_{3\text{AEMs}}$  fluxes were related to  $\text{NO}_{3\text{w}}$  by simple linear regression analysis using the REG procedure of SAS (SAS Institute, Inc. 1990). By the same procedure,  $\text{NO}_{3\text{AEMs}}$  and  $\text{NO}_{3\text{w}}$  measured in the spring of 1995 and 1996 were related to seasonal N uptake. Differences in the slopes of the regression curves were carried out using the Student's t test at the 5% level of significance. Experimental error variances were tested for homogeneity using Bartlett's

test (Steel and Torrie 1980). Since the interaction between treatments and sites was not significant in most of sampling dates, results are presented for the mean of the four sites except for the effect of organic matter on  $\text{NO}_{3w}$  and  $\text{NO}_{3\text{AEMS}}$  where results from each site are presented.

## RESULTS AND DISCUSSION

### Climatic Conditions

Air temperature and rainfall during the two growing seasons are presented in Table 3. Based on the 1995 and 1996 data and the long term average, Ste-Gertrude and Palmarolle (Abitibi region) were cooler than Laverlochere and Lorrainville (Temiscamingue region). Temperatures in May 1995 and 1996 were cooler than the long-term average at all sites and for all years. May 1996 was much dryer than May 1995. June was warmer and dryer than the long-term average in both years.

### Impact of Nitrogen Fertilizer on the $\text{NO}_3\text{-N}$ Sorbed on AEMs and Extracted by Water

On average (all treatments combined),  $\text{NO}_{3\text{AEMS}}$  ranged from  $0.22 \mu\text{g cm}^{-2} \text{d}^{-1}$  for the first contact period in 1996 to  $10.32 \mu\text{g cm}^{-2} \text{d}^{-1}$  for the first contact period in 1995 (Fig. 1). The high values obtained in 1995 may be related to higher amounts of inorganic N due to N fertilizer applied in the same day of AEMs burial (Table 2). The longer contact period with the soil in 1996 (240 d in 1996 vs. 13 d in 1995; Table 2) may explain the lower fluxes obtained in 1996.  $\text{NO}_{3\text{AEMS}}$  fluxes were significantly influenced by N fertilizer rates in all contact periods of 1995 and 1996 (Table 4). In contrast, N fertilizer rate had a positive effect on  $\text{NO}_{3w}$  only on the third sampling date in 1995 and 1996 (Table 4). Highest  $\text{NO}_{3\text{AEMS}}$  fluxes,  $16.33 \mu\text{g cm}^{-2} \text{d}^{-1}$  in 1995 and  $9.12 \mu\text{g cm}^{-2} \text{d}^{-1}$  in 1996, were observed with the N240 treatment on June 5 (first recovery) and July 31 (third recovery) respectively (Fig.1). These high fluxes were associated with contact periods immediately after the first and the second N applications (Table 2). Fluxes before or in between fertilizer applications were much lower. These results clearly indicate the ability of the AEMs technique to detect differences between N fertilizer treatments and then to predict

different levels of crop available N. These results agree with Paré et al. (1995). They observed higher  $\text{NO}_{3\text{AEMS}}$  in mineral fertilized plots than in control or manure plots of corn (*Zea mays* L.). The  $\text{NO}_{3\text{AEMS}}$  fluxes reported in the present study are much smaller than those of Paré et al. (1995) for  $200 \text{ kg N ha}^{-1}$  applied as  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  ( $46 \mu\text{g cm}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ). The temporal variation in  $\text{NO}_{3\text{w}}$  values in the present study was comparable to that  $\text{NO}_{3\text{AEMS}}$ .

### Variation of $\text{NO}_3\text{-N}$ Patterns

The relationship between soil organic matter (O.M.) content and  $\text{NO}_3^-$  sorbed on AEMs and extracted by water from the control plots in the springs of 1995 and 1996 is shown in Fig. 2. For instance, the Laverlochere site ( $118 \text{ g kg}^{-1}$  of O.M.) showed the highest  $\text{NO}_{3\text{AEMS}}$  in 1995 and 1996. However, highest amounts of  $\text{NO}_{3\text{w}}$  were observed at Ste-Gertrude in spring 1995 and at Laverlochère in spring 1996 (Fig. 2). These results may be explained partly by the contribution of N-mineralization from soil O.M. It is well known that the O.M. contents are related to N mineralization potentials (Jarvis et al. 1996; Simard and N'Dayegamiye 1993).  $\text{NO}_{3\text{AEMS}}$  fluxes increased with soil O.M. concentration at all sites in spring 1995 and 1996 except at Palmarolle ( $62 \text{ g kg}^{-1}$  of O.M.; Fig. 2). This site was located on a poorly drained soil with a flat topography. Waterlogging is known to limit N mineralization and nitrification from the soil organic pool (Vigil and Kissel 1995). Losses by denitrification are also increased by anoxic condition (Franzluebbers et al. 1995). In recent studies conducted in Saskatchewan, it was reported that AEMs were able to detect the effects of different tillage systems, landscape position and weed management on mineralizable N (Jowkin and Schoenau 1998; Qian and Schoenau 1995). In that study, the greatest rates of N mineralization as determined by AEMs were observed in the depression and the lowest in the crest of cultivated landscapes. The difference between results of the present study and those from Saskatchewan may be explained by variation in weather conditions, as shown by the lower water availability in the Canadian prairies than in Abitibi-Temiscamingue. The waterlogged Palmarolle site had also much lower  $\text{NO}_{3\text{w}}$  contents than other sites (Fig. 2) indicating a pattern of results comparable to that obtained by conventional methods.

Results presented in Fig. 2 also indicate that the amounts of  $\text{NO}_{3\text{AEMS}}$  were higher at all sites in 1995 than in 1996. However, higher amounts of  $\text{NO}_{3\text{w}}$  were obtained in 1996 except at Ste-Gertrude. This may be partly explained by the climatic conditions during the spring of 1995. The amount of precipitation received in May 1995 was at least four times higher than the amount received in May 1996 (Table 3). The soil N mineralization potential has been shown to be affected by climatic factors such as temperature and moisture (Cassman and Munns 1980; Ellert and Bettany 1992; Simard and N'Dayegamiye 1993). The lower amount of  $\text{NO}_{3\text{w}}$  in 1995 may be partly attributed to  $\text{NO}_3\text{-N}$  leaching and denitrification (Aulakh and Rennie 1987, Liang et al. 1991). It is well known that precipitation and water excess can increase nitrate leaching in the soil profile (Liang et al. 1991). The  $\text{NO}_{3\text{w}}$  content in the 15-30 and 30-60 cm layers during 1995 was higher than that in the 0-15 cm layer (data not shown). These different patterns of results obtained with AEMs and water extraction were expected since AEMs are thought to act as a sink submitted to soil conditions for a defined lapse of time while chemical extractions (*i. e.* water) only measure static pools (Yang et al. 1991; Abrams and Jarrel 1992).

#### **Relationship Between Water and AEMs-Extractable $\text{NO}_3\text{-N}$**

A significant relationship between  $\text{NO}_{3\text{AEMS}}$  and  $\text{NO}_{3\text{w}}$  was obtained for all contact periods during 1995 and 1996. Coefficients of determination for this relationship varied from 0.35 (contact period no 1) to 0.98 (contact period no 3) (Figs. 3, 4). This close correlation for the third contact period corresponded to the best relationship between  $\text{NO}_{3\text{w}}$  and fertilizer rates. In addition, N fertilizer had a positive effect on  $\text{NO}_{3\text{w}}$  only on the third sampling date in 1995 and 1996 as reported previously. The  $\text{NO}_{3\text{AEMS}}$  fluxes were positively related to  $\text{NO}_{3\text{w}}$  concentrations. These results agree with those of Qian et al. (1992) who reported a close correlation between AEMs and  $\text{CaCl}_2$  (0.001 M) extractable  $\text{NO}_3^-$ . This close correlation between the two methods is expected since most of the nitrate in the soil is in water soluble form and not strongly retained by the soil matrix and both methods are effective in removing a high proportion of  $\text{NO}_3\text{-N}$  (Subler et al. 1995; Paré et al. 1995). The high coefficients of determination obtained, except at the first sampling date in 1996 (Fig. 4b), provide evidence that AEMs is an excellent predictor of the intensity of



soluble N in the soil and represent an accurate method of measuring  $\text{NO}_3\text{-N}$  soil fluxes under different soil conditions. The slopes of regression curves presented in Figs. 3 and 4 were statistically different at the 5% level of significance. They varied between 1.08 for the first contact period in 1995 to 89.77 for the second contact period in 1996. The change in slope with contact periods can be interpreted by the difference in  $\text{NO}_{3\text{AEMs}}$  fluxes and nutrient activity in soil solution (Yang et al. 1991). In general, the highest slopes were obtained after N-fertilizer application (Table 2) indicating high  $\text{NO}_3\text{-N}$  concentrations in soil solution.

### **Relationship Between $\text{NO}_{3\text{AEMs}}$ Fluxes, Seasonal Forage DM Yield and Seasonal Forage N Uptake**

Nitrogen fertilizer rates significantly affected forage DM yield and forage N uptake ( $P < 0.001$ ; Table 5). This is related to differences in  $\text{NO}_3^-$  availability in soils as measured by the two methods. Total seasonal DM yield in 1995 ranged from 3  $\text{Mg ha}^{-1}$  (N0 treatment: low soil-N content) to 5  $\text{Mg ha}^{-1}$  (N240 treatment: high soil-N content). A comparable pattern was observed in 1996 (Table 6).

Total N uptake in 1995 ranged from 71  $\text{kg N ha}^{-1}$  for the N0 treatment (lowest soil N availability as predicted by AEMs) to 157  $\text{kg N ha}^{-1}$  for the N240 treatment (highest soil N availability as predicted by AEMs). Comparable results were obtained in 1996 and cumulative N uptake varied between 53 and 158  $\text{kg N ha}^{-1}$  (Table 6). Figure 5 shows forage N uptake related to soil  $\text{NO}_3\text{-N}$  availability as determined by AEMs and water extraction at the first sampling date (Table 2) in spring of 1995 and 1996. Coefficients of determination varied between 0.39 to 0.97. The closer relationship between  $\text{NO}_{3\text{AEMs}}$  and forage N uptake than with  $\text{NO}_{3\text{w}}$  suggests that the AEMs can provide a better prediction of soil N availability than water extraction. The strong relationship between cumulative N uptake and  $\text{NO}_{3\text{AEMs}}$  can be explained by the ability of the AEMs to continually sorb the mineralized and fertilizer derived  $\text{NO}_3\text{-N}$  in a way similar to plant roots in terms of their anion-exchange behaviour (Subler et al. 1995). The higher N uptake in the tissue of hay reflects greater soil N availability as predicted by AEMs and water extraction. The slopes

of regression curves presented in Fig. 5 are not statistically different at the 5% level when  $\text{NO}_3\text{-N}$  was extracted with water. This indicates that the relationship between cumulative N uptake and  $\text{NO}_{3w}$  is independent of the sampling period which is not the case for AEMs. The fact that the slope of the relationship between cumulative N uptake and  $\text{NO}_{3\text{AEMs}}$  was dependent on time of contact between AEMs and the soil deserves more study. Nitrogen fluxes are variable through time (Binkley and Matson 1983; Dobermann et al. 1997) and separate calibration may be needed depending on the time of AEMs use. However, since  $\text{NO}_{3\text{AEMs}}$  is more closely correlated with N uptake than  $\text{NO}_{3w}$  during the two growing seasons, AEMs is likely a more appropriate method for monitoring plant-available  $\text{NO}_3^-$  and for determining the contribution mineralization of the soil N organic pool.

The relationships between cumulative forage N uptake from N0 treatment (control) and soil  $\text{NO}_3\text{-N}$  as determined by AEMs and water extraction in spring 1996 in three out of four sites (Palmarolle site was left out) are presented in Fig. 6. A significant correlation was obtained with AEMs ( $R^2 = 0.60^{**}$ ) whereas the relationship with  $\text{NO}_{3w}$  was not significant ( $R^2 = 0.28$ ). However, when all sites were analyzed, a poor correlation was obtained with the two used methods. This is due to Palmarolle site characterized by a flat topography and an excess of water. A higher N uptake, explained by the highest yield in this site resulting from non limiting water availability (Table 6), was obtained during the two experimental years. Timothy, the main crop in this site is recognized by its high water requirements and is very responsive to N fertilizers (Calder and MacLeod 1968; Edwards 1989).

## CONCLUSION

Our results indicate that the use of AEMs *in situ* is a promising method to evaluate soil N availability to grasses in a cool continental climate. This method is suitable to measure the intensity of inorganic N solubility. The observed relationship between the  $\text{NO}_{3\text{AEMs}}$  fluxes from the control plot and the soil organic matter content indicates that AEMs may be useful to monitor soils N mineralization under comparable drainage conditions. This confirms the observations made in the Canadian prairies. Furthermore, as

previously reported, AEMs integrate the temporal pattern of soil N availability and is sensitive to waterlogging and landscape variations. The fact that the largest N uptake was observed at a poorly drained site (Palmarolle) suggests that water availability may have been a factor limiting forage yields and hence N uptake. The N soil tests are limited to the prediction of soil N availability and cannot take into account external factors such as water or other nutrient availability.

The grinding, weighing and filtering of soil samples required for soil water extraction could be avoided if AEMs are used as a predictive tool to assess soil N availability. This would solve the problem of handling and rapid processing of soil samples for the effective testing of  $\text{NO}_3\text{-N}$ . Results of the present study clearly indicate that AEMs is a promising tool for estimating soil N availability to grass forage from clay soils in cool continental climates.

#### **ACKNOWLEDGMENTS**

The research project was supported by the Agriculture Canada Trials and Research in Agri-Food Program (Project # AE-081). The help of G. Parent, N. Olivier, and C. Lafrenière in every part of the project is greatly appreciated. The authors wish to thank G. Bélanger, V. Rodd and M. J. Garand for their comments on early versions of this manuscript.

## REFERENCES

- Abrams, M. M., and Jarrel, W. M. 1992.** Bioavailability index for phosphorus using ion exchange resin-impregnated membranes. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **56**: 1532-1537.
- Allen, E. R., Unruh, L. G., and Johnson, G. V. 1994.** Current Approaches to soil testing Methods: Problems and solutions. Pages 203-220 *in* J. L. Havlin, ed. *Soil Testing: Prospects for improving nutrient recommendations*. SSSA Spec. Publ. 40. ASA and SSSA, Madison, WI.
- Amer, F., Boulin, D. R., Black, C. A. and Duke, F. R. 1955.** Characterization of soil phosphorus by anion exchange resin adsorption and P32-equilibration. *Plant Soil* **6**: 391-408.
- Aulakh, M. S. and Rennie, D. A. 1987.** Effect of wheat straw incorporation on denitrification of N under anaerobic and aerobic conditions. *Can. J. Soil Sci.* **67**: 825-834.
- Binkley, D. and Matson, P. 1983.** Ion exchange resin bag method for assessing forest soil nitrogen availability. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **47**: 1050-1052.
- Bremner, J. M. and Mulvaney, C. S. 1982.** Nitrogen-total. Pages 595-624. *in* A. L. Page, R. H. Miller, and D. R. Keeney, eds. *Methods of soil analysis. Part.2. Chemical and microbiological properties*. Agron. 9. ASA-SSSA. Madison. WI. USA.
- Bundy, L. G. and Meisinger, J. J. 1994.** Nitrogen availability indices. Pages 951-978 *in* S. H. Mickelson, ed. *Methods of soil analysis. Part 2. Microbiological and biochemical properties*. SSSA. Madison, WI.
- Calder, F. W. and MacLeod, L. B. 1968.** In vitro digestibility of forage species as affected by fertilizer application, stage of development and harvest dates. *Can. J. Plant Sci.* **48**: 17-24.

- Cassman, K. G. and Munns, D. N. 1980.** Nitrogen mineralisation as affected by soil moisture, temperature and depth. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44: 1233-1237.
- Conseil des Productions Végétales du Québec. 1994.** Grilles de Références en Fertilisation. Agdex 540. Gouvernement du Québec, Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation. 128pp.
- Cooperband, L. R. and Logan, T. J. 1994.** Measuring *in situ* changes in labile soil phosphorus with anion- exchange membranes. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58: 105-114.
- Dobermann, A., Pampolino, M. F. and Adviento, M. A. A. 1997.** Resin capsules for on-site assessment of soil nutrient supply in lowland rice fields. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61: 1202-1213.
- Dubé, P. A., Chevrette, J. E. and Lamb, E. 1982.** Agrométéorologie. Agdex 070. Atlas Agroclimatique du Québec Méridional. Données Dérivées de la température. Gouvernement du Québec, MAPAQ.
- Edwards, L. M. 1989.** Effects of urea and ammonium nitrate on production and nutritive performance of timothy. *Forage Notes.* 34: 11-20.
- Ellert, B. H. and Bettany, J. R. 1992.** Temperature dependence of net nitrogen and sulfur mineralization. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56: 1133-1141.
- Franzluebbers, A. J, Hons, F. M. and Zuberer, D. A. 1995.** Tillage and crop effects on seasonal soil carbon and nitrogen dynamics. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59: 1618-1624.
- Gagnon, B., Simard, R. R., Robitaille, R., Goulet, M. and Rioux, R. 1997.** Effect of composts and inorganic fertilizers on spring wheat growth and N uptake. *Can. J. Soil Sci.* 77: 487-495.
- Gagnon, B., Simard, R. R., Robitaille, R., Goulet, M. and Rioux, R. 1998.** Soil nitrogen and moisture as influenced by composts and inorganic fertilizer rate. *Can. J. Soil*

Sci. 78: 207-215.

**Gibson, D. J. 1986.** Spatial and temporal heterogeneity in soil nutrient supply measured using *in situ* ion-exchange resin bags. *Plant and Soil*. **96**: 445-450.

**Hendershot, W. H., Lalonde, H. and Duquette, M. 1993.** Ion exchange and exchangeable cations. Pages 167-176. *in* M. R. Carter, ed. *Soil sampling and methods of analysis*. Canadian Society of Soil Science. Lewis Publishers, Boca Raton, FL.

**Jarvis, S. C., Stockdale, E. A., Shepherd, M. A. and Powlson, D. S. 1996.** Nitrogen mineralization in temperate agricultural soils: Processes and measurement. *Adv. Agron.* **57**: 187-235.

**Jowkin, V. and Schoenau, J. J. 1998.** Impact of tillage and landscape position on nitrogen availability and yield of spring wheat in the Brown soil zone in southwestern Saskatchewan. *Can. J. Soil Sci.* **78**: 563-572.

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

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

**Paré, T., Gregorich, E. G. and Ellert, B. H. 1995.** Comparison of soil nitrate extracted by potassium chloride and adsorbed on an anion exchange membrane *in situ*. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* **26**: 883-898.

**Qian, P. and Schoenau, J. J. 1995.** Assessing nitrogen mineralization from soil organic matter using anion exchange membranes. *Fert. Res.* **40**: 143-148.

**Qian, P., Schoenau, J. J. and Huang, W. Z. 1992.** Use of ion exchange membranes in

routine soil testing. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* **23**: 1791-1804.

**Richards, J. E. 1993.** Chemical characterization of plant tissue. Pages 115-139. *in* M. R. Carter, ed. *Soil sampling and methods of analysis*. Canadian Society of Soil Science. Lewis Publishers, Boca Raton, FL.

**Rompré, M. and Carrier, D. 1997.** Étude pédologique des sols défrichés de l'Abitibi-Témiscamingue. MAPAQ (ISBN 2-550-30732-1). Bibliothèque nationale du Québec. Québec.

**Saggar, S., Hedley, M. J. and White, R. E. 1990.** A simplified resin membrane technique for extracting phosphorus from soils. *Fert. Res.* **24**: 173-180.

**SAS Institute, Inc. 1990.** SAS/STAT user's guide. Version 6, 4th ed. SAS Institute Inc., Cary NC.

**Schoenau, J. J. and Huang, W. Z. 1991.** Anion exchange membrane, water, and sodium bicarbonate extractions as soil tests for phosphorus. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* **22**: 465-492.

**Sheldrick, B. H, and Wang, C. 1993.** Particle size distribution. Pages 499-511. *in* M. R. Carter, ed. *Soil sampling and methods of analysis*. Canadian Society of Soil Science. Lewis Publishers, Boca Raton, FL.

**Simard, R. R. and N'Dayegamiye, A. 1993.** Nitrogen mineralization potential of meadow soils. *Can. J. Soil Sci.* **73**: 27-38.

**Simard, R. R., DeKimpe, C. R. and Zizka, J. 1989.** The kinetic of non exchangeable potassium and magnesium released from Quebec soils. *Can. J. Soil Sci.* **69**: 663-675.

**Skogley, E. O. 1994.** Reinventing soil testing for the future. Pages 187-201. *in* J. L. Havlin, ed. *Soil Testing: Prospects for improving nutrient recommendations*. SSSA Spec. Publ. 40. ASA and SSSA, Madison, WI.

**Skogley, E. O. and Dobermann, A. 1996.** Synthetic ion-exchange resins: soil and environmental studies. *J. Environ. Qual.* **25**: 13-24.

**Steel, R. G. D and Torrie, J. H. 1980.** Principles and procedures of statistics: A biometrical approach. 2<sup>nd</sup> ed. McGraw-Hill Book Company, New York, NY. 633 pp.

**Subler, S., Blair, J. M. and Edwards, C. A. 1995.** Using anion-exchange membranes to measure soil nitrate availability and net nitrification. *Soil Biol. Biochem.* **27**: 911-917.

**Tiessen, H. and Moir, J. O. 1993.** Total and organic carbon. Pages 187-199. *in* M. R. Carter, ed. Soil sampling and methods of analyses. Canadian Society of Soil Science. Lewis Publishers, Boca Raton, FL.

**Todd, G. C. 1993.** Soil water content. Pages 541-557. *in* M. R. Carter, ed. Soil sampling and methods of analyses. Canadian Society of Soil Science. Lewis Publishers, Boca Raton, FL.

**Tran, T. Sen and 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, FL.

**Vaidyanathan, L. V. and Nye, P. H. 1966.** The measurement and mechanism of ion diffusion in soils. II. an exchange resin paper method for measurement of the diffusive flux and diffusion coefficient of nutrient ions in soils. *J. Soil Sci.* **17**: 175-183.

**Vigil, M. F. and Kissel, D. E. 1995.** Rate of nitrogen mineralized from incorporated crop residues as influenced by temperature. *Soil Sci. Soc. Am.J.* **59**: 1636-1644.

**Whitehead, D. C. 1995a.** Grasses: Uptake of nitrogen and effects on morphology and physiology. Pages 17-35. *in* Grassland nitrogen. Cab Intern., Oxford, UK.

**Whitehead, D. C. 1995b.** Mineralization, immobilization and availability of nitrogen in soils. Pages 108-129. *in* Grassland nitrogen. Cab Intern., Oxford, UK.



**Yang, J. E., Skogley, E. O., Georgitis, S. J., Schaff, B. E. and Ferguson, A. H. 1991.**  
Phyto-availability soil test: Development and verification of Theory. Soil Sci. Soc. Am. J.  
**55:** 1358-1365.

### LEGEND OF FIGURES

**Fig.1.**  $\text{NO}_3\text{-N}$  sorbed on AEMs and extracted by water at several sampling dates in 1995 and 1996. Each value represents the mean of the four sites. Bars indicate standard error of the mean for each sampling date.

**Fig. 2.** Relationship between soil organic matter content and  $\text{NO}_3\text{-N}$  sorbed on AEMs (a) and extracted by water (b) from the control treatment in springs of 1995 and 1996. Bars indicate standard error of the mean for each site.

**Fig. 3.** Relationship between  $\text{NO}_3\text{-N}$  sorbed on AEMs and extracted by water for the 1995 growing season: (a) first sampling date; (b) second sampling date; (c) third sampling date. Each value represents the mean of the four sites. \*,\*\*\* Significant at the 0.05 and 0.001 probability level, respectively.

**Fig. 4.** Relationship between  $\text{NO}_3\text{-N}$  sorbed on AEMs and extracted by water for the 1996 growing season: (a) first sampling date; (b) second sampling date; (c) third sampling date. Each value represents the mean of the four sites. \*,\*\*,\*\*\* Significant at the 0.05, 0.01 and 0.001 probability level, respectively.

**Fig. 5.** Relationship between seasonal N uptake and soil  $\text{NO}_3\text{-N}$  as determined by AEMs and water extraction in spring 1995 and 1996. Lines represent the linear regression. Each value represents the mean of the four sites. \*,\*\*\* Significant at the 0.05 and 0.001 probability level, respectively.

**Fig. 6.** Relationship between  $\text{NO}_3\text{-N}$  as extracted by AEMs (a) and by water (b) from  $\text{NO}$  treatment in spring 1996 and cumulative N-uptake. Each value represents one repetition of each site (three over four; Palmarolle site was left out). \*\*, NS Significant at the 0.01 probability level and not significant, respectively.

Table 1. Chemical and physical properties and location of experimental soils

Sites	Ste-Gertrude	Palmarolle	Laverlochere	Lorrainville
pH	5.9	6.0	7.2	6.3
O.M. <sup>z</sup> (g kg <sup>-1</sup> )	45.0	62.0	118.0	52.0
total N (g kg <sup>-1</sup> )	1.89	2.64	3.43	2.25
CEC <sup>y</sup> (cmol(+) kg <sup>-1</sup> )	36.82	35.0	41.14	24.4
<b>Particle size distribution (g kg<sup>-1</sup>)</b>				
Clay	860	850	700	700
Sand	18	26	15	28
Silt	122	124	285	272
<b>Mehlich 3 (mg kg<sup>-1</sup>)</b>				
P	11	25	28	19
K	180	190	232	135
Ca	2604	2859	5609	2250
Mg	518	535	520	367
Latitude	48° 34' N	48° 47' N	47° 21' N	47° 21' N
Longitude	78° 8' W	79° 13' W	79° 26' W	79° 26' W

<sup>z</sup>O.M. =Organic Matter<sup>y</sup>CEC = Cation Exchange Capacity

Table 2. Field work calendar in 1995 and 1996 for the Ste-Gertrude site

	Soil sampling and AEMs burial <sup>z</sup>	Recovery AEMs <sup>y</sup>	Length of AEMs contact with soil (days) <sup>x</sup>	N fertilizer application <sup>w</sup>	Harvest number
<b>1995</b>					
24 May	1st	-		50%	
5 June	-	1st	13		
19 June	2nd	2nd	13	50%	1
31 July	3rd	3rd	39		2
26 September	4th	4th	56		
<b>1996</b>					
22 May	1st	1st	240	50%	
18 June	2nd	2nd	27	50%	1
31 July	3rd	3rd	43		2

<sup>z</sup> soils are sampled for water soluble NO<sub>3</sub>-N extraction ( 3 and 4 times during 1995 and 1996 respectively) and AEMs are placed vertically in the surface soil.

<sup>y</sup> After each contact period with the soil, AEMs were collected and replaced by similar membranes.

<sup>x</sup> Values obtained by the difference between the date of AEMs recovery and placement.

<sup>w</sup>percentage of the total N application as fertilizer during the growing season.

Table 3. Temperature and rainfall during the two growing seasons

	May	June	July	August	September	
<b>Temperature (°C)</b>						
<b>Ste-Gertrude</b>						
1995	9.0	16.7	18.2	17.1	9.1	
1996	6.8	16.7	16.5	16.4	13.4	
Long term monthly average (1961-1990)	9.7	14.3	17.3	15.7	9.9	
<b>Palmarolle</b>						
1995	8.1	15.9	17.8	16.3	9.1	
1996	8.6	16.3	16.1	16.4	12.8	
Long term monthly average (1961-1990)	9.6	14.0	17.0	15.2	9.4	
<b>Laverlochere and Lorrainville</b>						
1995	10.3	17.5	19.4	18.3	10.5	
1996	9.3	16.9	17.0	17.3	13.8	
Long term monthly average (1961-1990)	10.7	14.8	18.5	16.8	11.2	
<b>Rainfall (mm)</b>						
<b>Ste-Gertrude</b>						<b>Total</b>
1995	98.2	46.0	140.4	39.1	111.4	435.1
1996	34.7	70.6	115.4	64.3	64.1	349.1
Long term monthly average (1961-1990)	73.8	101.9	109.7	103.3	120.1	508.8
<b>Palmarolle</b>						
1995	109.2	42.0	110.8	34.8	79.9	376.7
1996	40.0	70.6	111.2	84.1	78.9	384.8
Long term monthly average (1961-1990)	76.8	93.7	95.3	98.3	107.3	471.4
<b>Laverlochere and Lorrainville</b>						
1995	121.1	66.0	124.6	26.1	93.1	430.9
1996	29.5	64.7	136.7	73.0	92.8	396.7
Long term monthly average (1961-1990)	66.7	76.4	75.0	63.7	101.5	383.3

Table 4. Analysis of variance (mean square values) of the effects of N fertilizer and sites on NO<sub>3</sub>-N sorbed on AEMs and extracted by water in 1995 and 1996

		NO <sub>3</sub> -N sorbed on AEMs (NO <sub>3AEMs</sub> )						
		Contact period number <sup>z</sup>						
Source of variation	d.f	1995				1996		
		1	2	3	4	1	2	3
Sites (S)	3	305.73**	4.12**	25.68***	1.47	0.92***	11.57**	296.81***
Rep(Sites)	12	130.35	1.00	0.75	0.3	0.008	0.288	0.492
Treatments (T)	4	452.70***	9.31**	119.92***	16.03***	0.03***	0.72*	224.72***
T * S	12	86.39	3.69	10.07***	0.83	0.06	0.393	61.30***
Error	48	85.14	2.36	3.193	0.71	0.02	0.258	4.06
		Water extractable NO <sub>3</sub> -N (NO <sub>3w</sub> )						
		Soil sampling number <sup>y</sup>						
Source of variation	d.f	1995 (X 10 <sup>3</sup> )				1996(X 10 <sup>3</sup> )		
		1	2	3	4	1	2	3
Sites (S)	3	24.33***	10.05***	15.15*	10.03***	12.08***	38.58***	54.31***
Rep(Sites)	12	14.805	0.42	0.19	0.386	0.096	5.252	2.122
Treatments (T)	4	0.544	2.31	53.93***	0.234	0.341	8.09	43.87***
T* S	12	1.244	0.751	1.792	0.493	0.132	3.723	8.39**
Error	48	2.248	1.266	4.387	0.357	0.201	4.919	4.457

<sup>z</sup> NO<sub>3</sub>-N sorbed on AEMs were evaluated four times in 1995 and three times in 1996 according to Table 2.

<sup>y</sup> Soils were sampled four times in 1995 and three times in 1996 to determine water soluble NO<sub>3</sub>-N according to Table 2.

\*\*\*, \*\*, \* significant at P < 0.001, P < 0.01 and P < 0.05, respectively.

Table 5 . Analysis of variance (mean square values) for seasonal forage dry matter (DM) yield and seasonal N uptake as affected by N fertilizer rates and sites in 1995 and 1996

Source of variation	d.f	Seasonal DM yield (*10 <sup>6</sup> )		Seasonal N uptake (*10 <sup>3</sup> )	
		1995	1996	1995	1996
Sites (S)	3	7.62***	5.15***	10.16***	7.81***
Rep(sites)	12	0.38**	0.24	0.62	0.386
Treatments	4	6.71***	12.94***	19.41***	27.50***
T* S	12	0.18***	0.26	0.40	0.59
Error	48	0.16	0.23	0.34	0.23

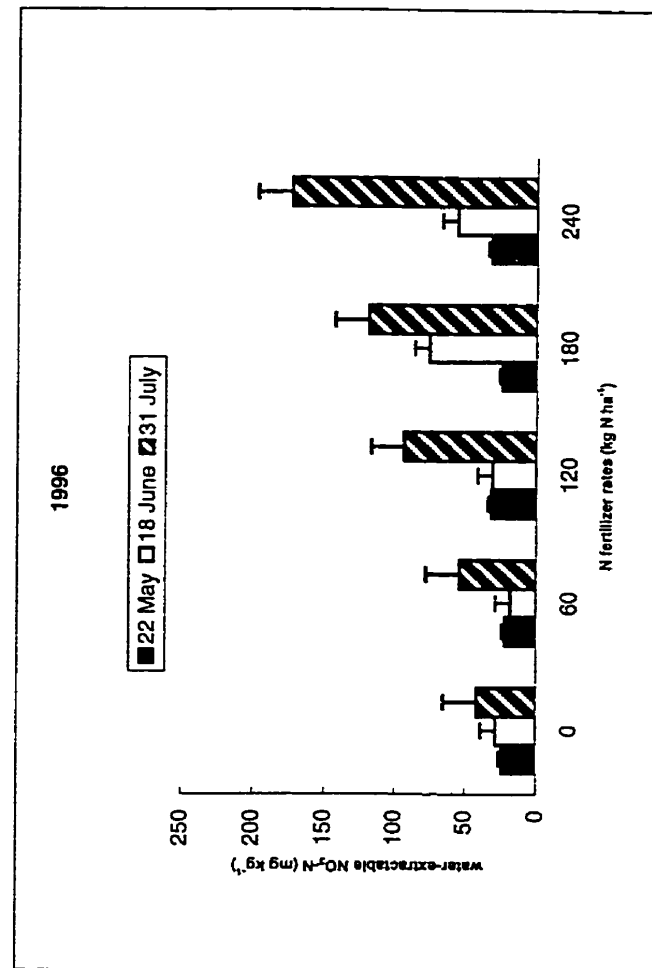
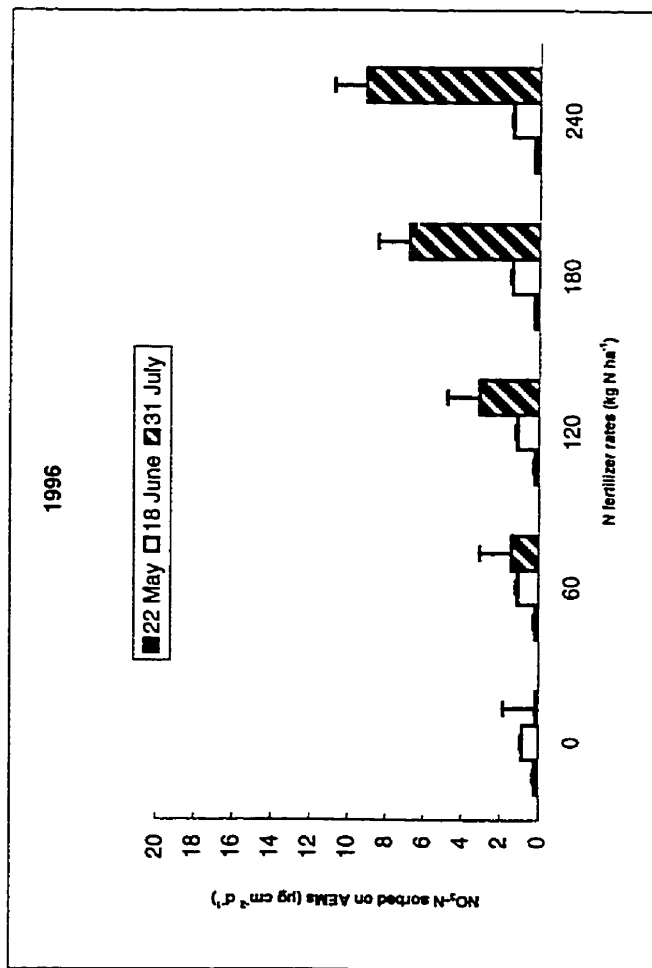
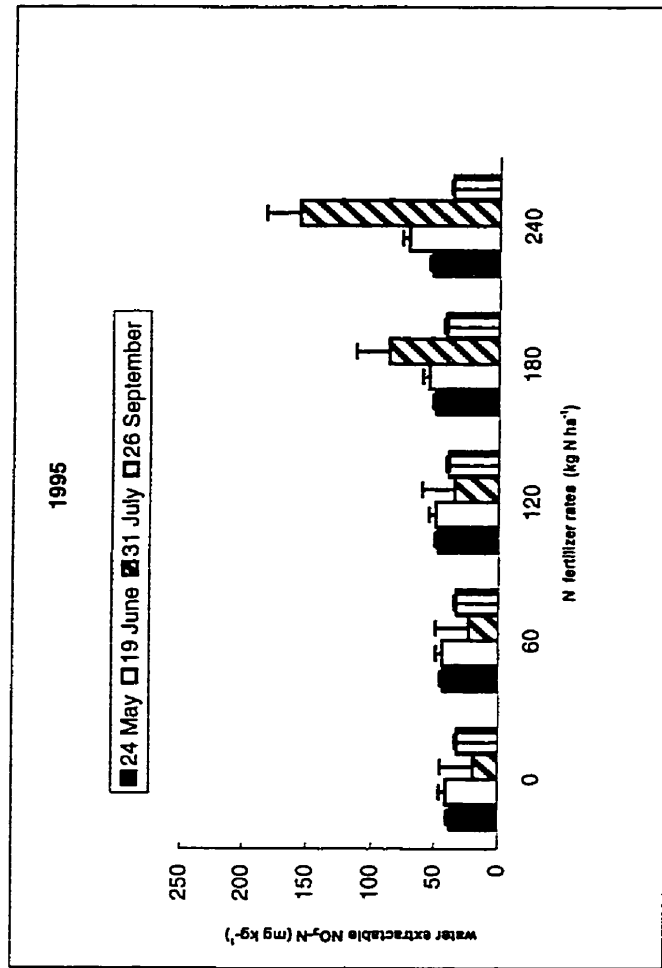
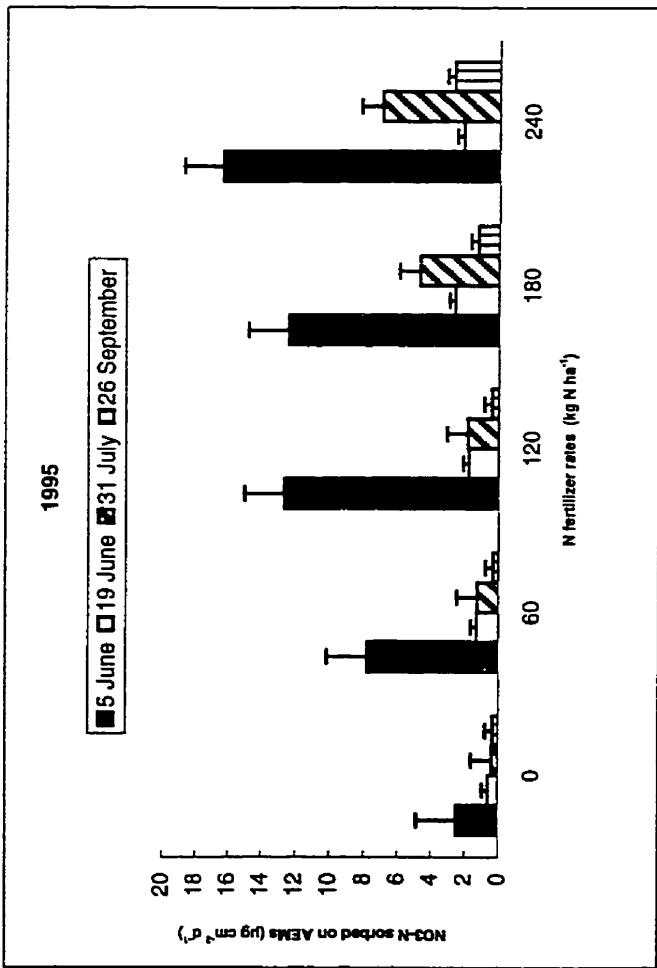
\*\* , \*\*\* significant at P < 0.01 and 0.001 respectively.



**Table 6 Effect of N fertilizer on cumulative forage dry matter yield and cumulative forage N uptake**

Sites	N rates (kg N ha <sup>-1</sup> )	N-uptake (kg N ha <sup>-1</sup> )		Yield (t ha <sup>-1</sup> )	
		1995	1996	1995	1996
1	0	43.3	27.76	2.0	1.2
1	60	63.0	55.7	2.6	2.6
1	120	78.3	88.4	2.9	3.4
1	180	111.8	100.3	3.8	3.6
1	240	111.7	111.9	3.6	3.7
2	0	88.8	80.9	3.6	3.0
2	60	97.8	85.5	4.2	3.5
2	120	130.9	124.9	5.6	4.7
2	180	142.6	124.3	5.5	4.7
2	240	166.7	169.3	5.6	5.9
3	0	82.4	64.6	3.3	2.6
3	60	100.0	90.0	4.2	3.8
3	120	119.1	112.4	4.6	4.5
3	180	159.5	153.4	5.7	5.6
3	240	165.3	175.6	5.5	6.3
4	0	70.6	39.6	2.9	1.7
4	60	104.6	80.0	4.0	3.1
4	120	141.3	118.0	5.1	4.3
4	180	142.8	143.7	5.1	4.9
4	240	185.9	174.0	5.8	5.6
mean	0	71.3	53.2	2.9	2.1
	60	91.4	77.8	3.8	3.2
	120	117.4	110.9	4.5	4.2
	180	139.1	130.4	5.0	4.7
	240	157.4	157.7	5.1	5.3

Figure 1



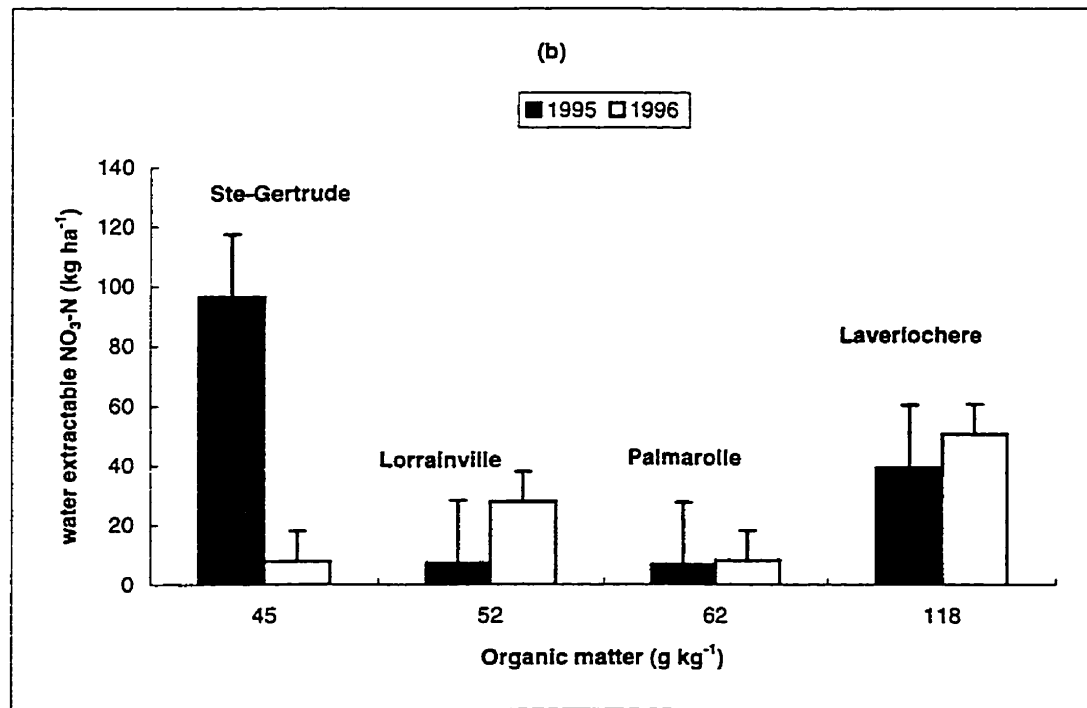
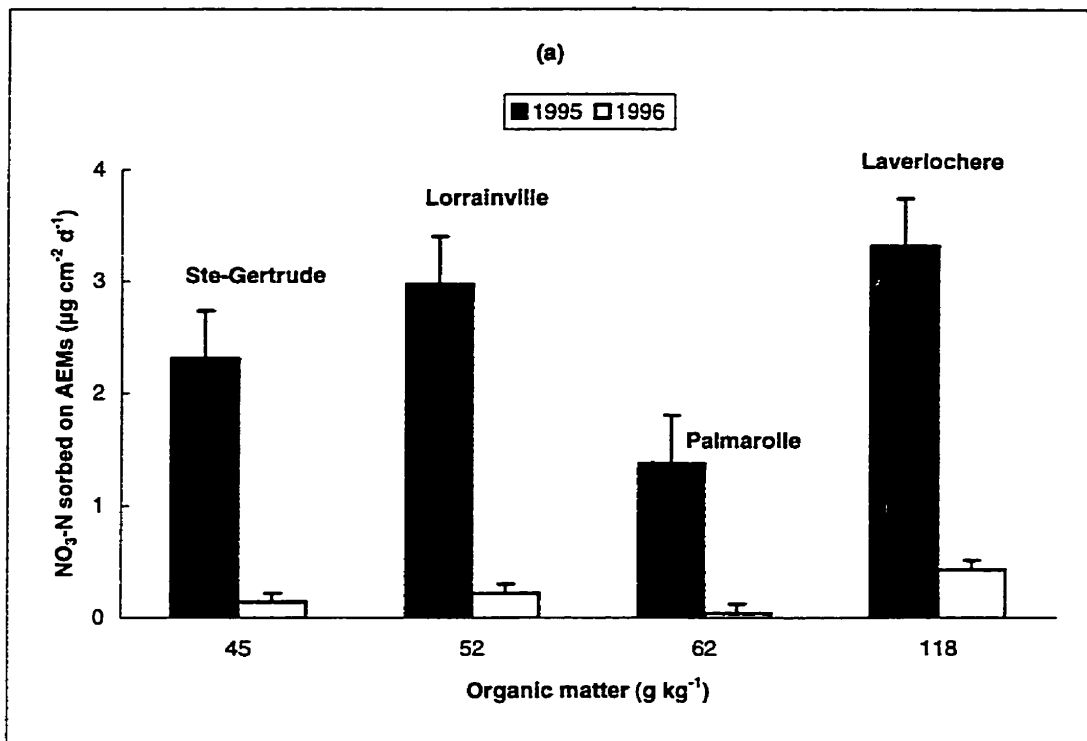


Figure 2

Figure 3

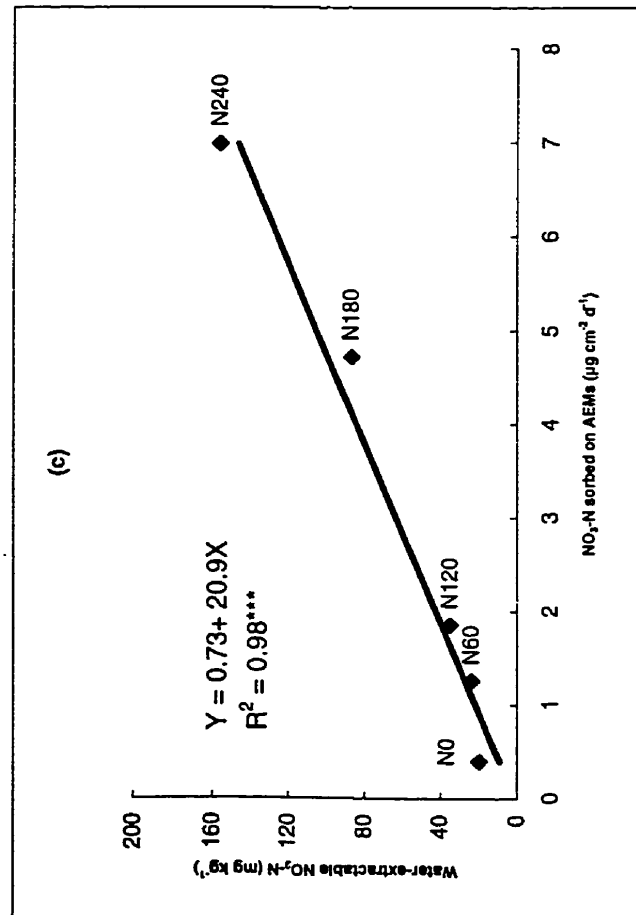
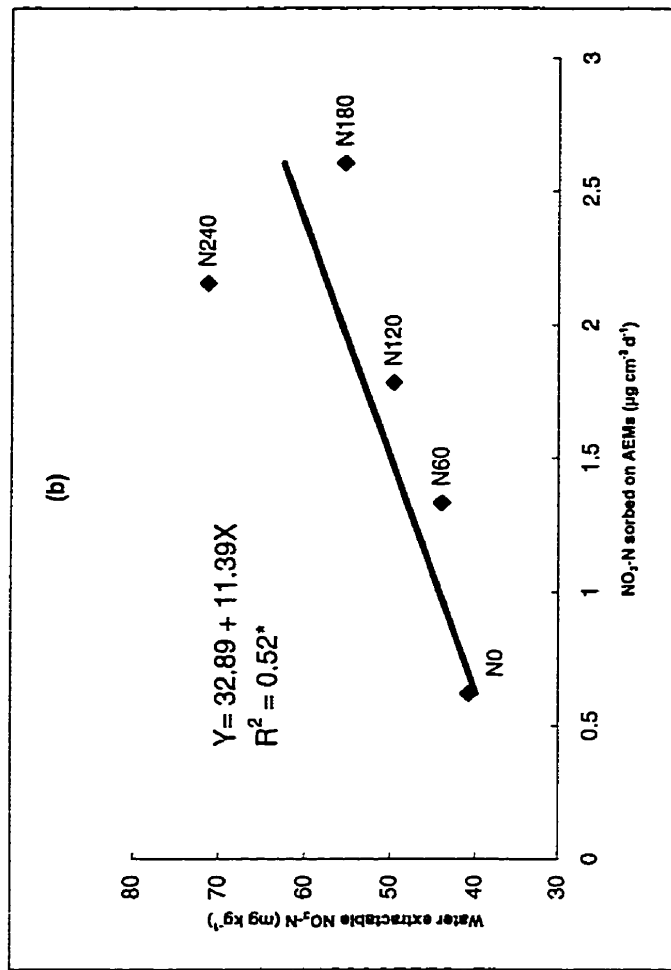
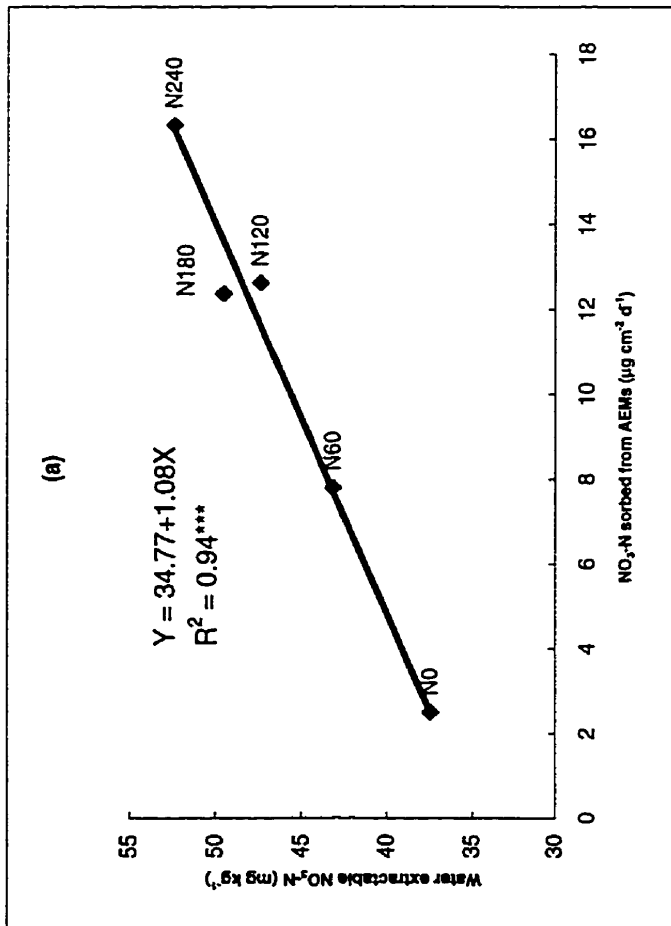


Figure 4

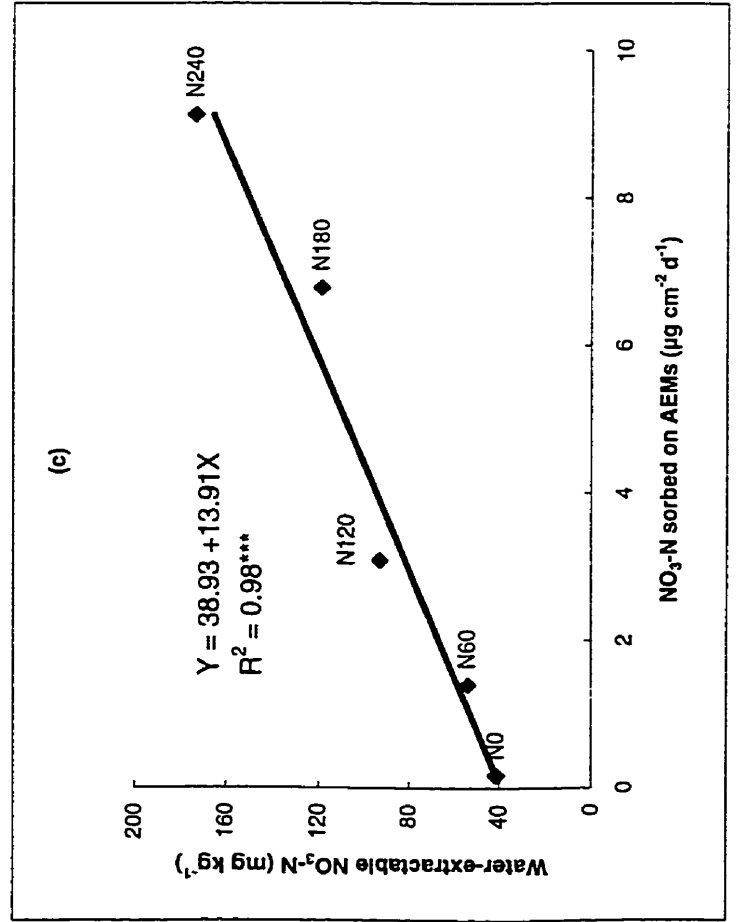
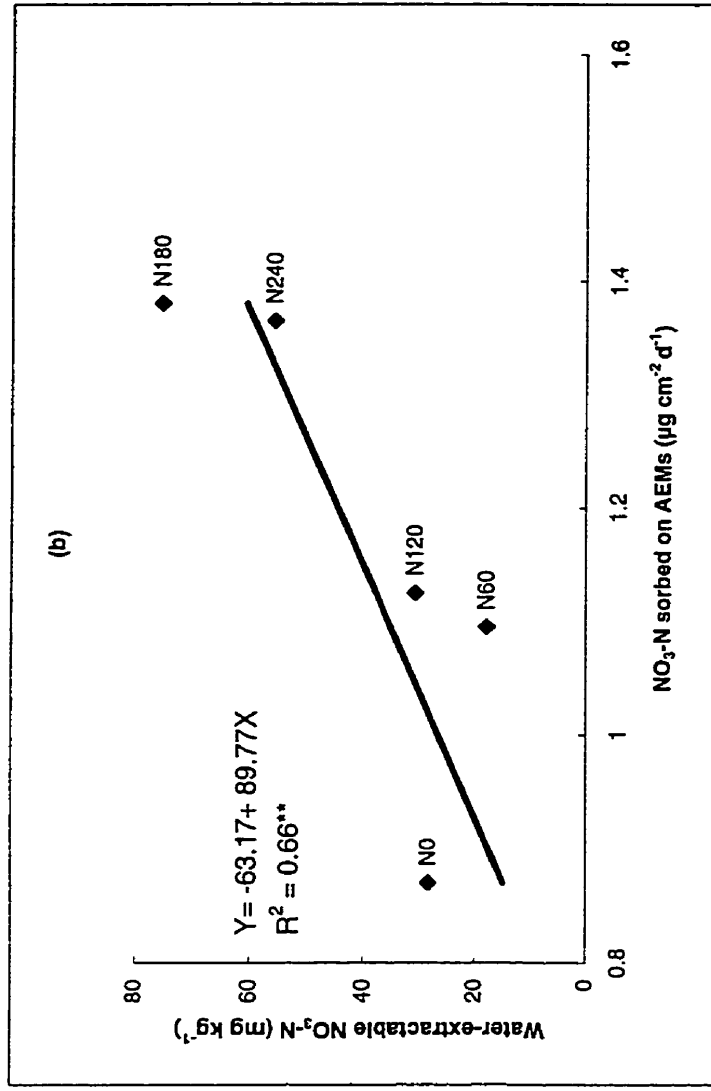
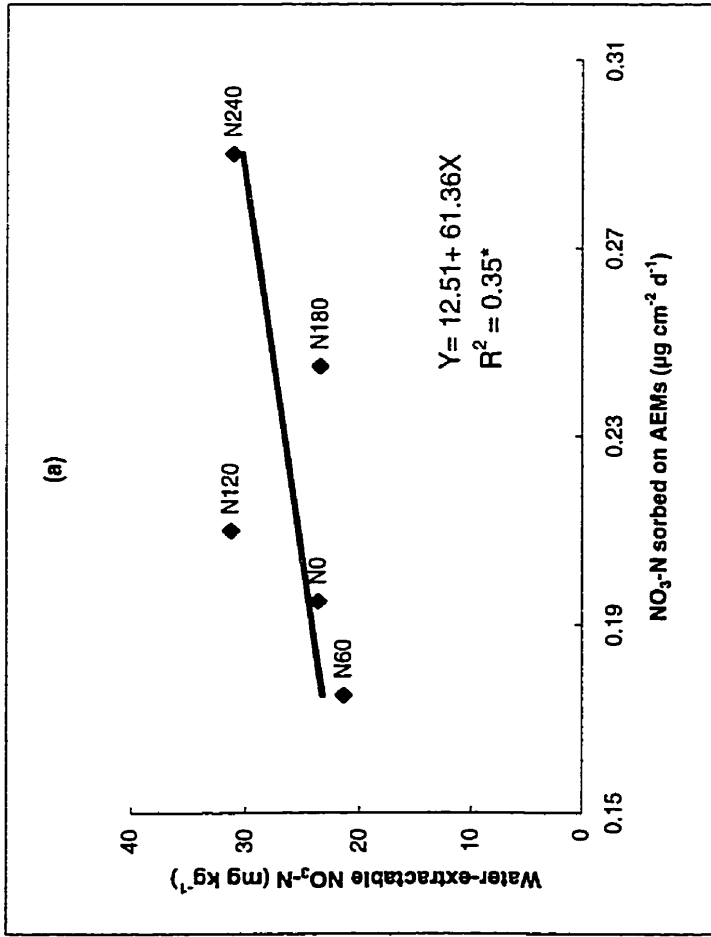
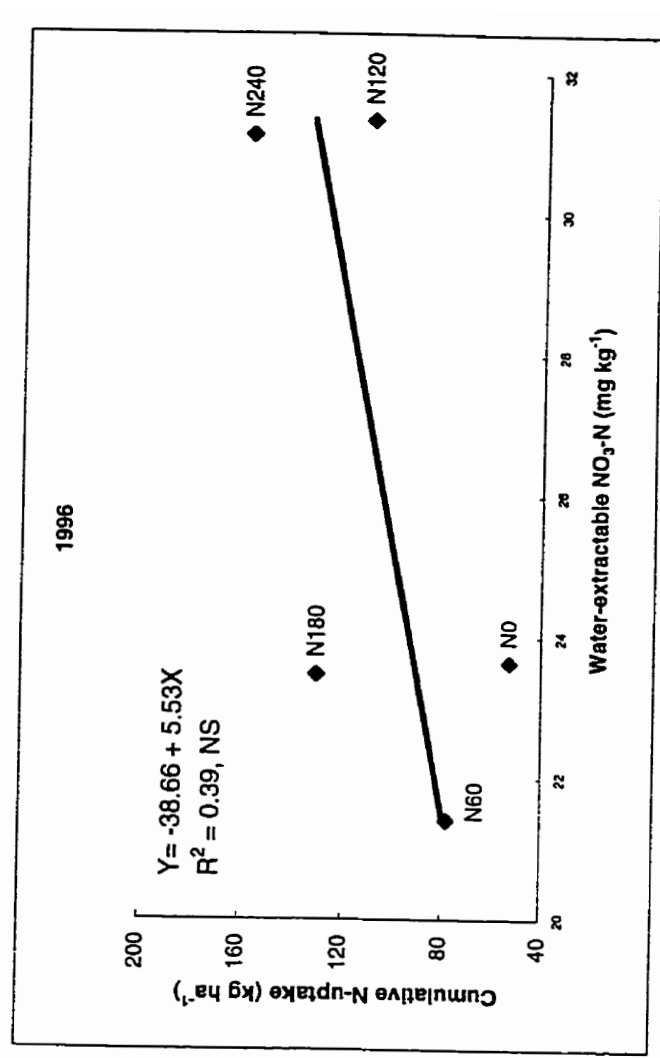
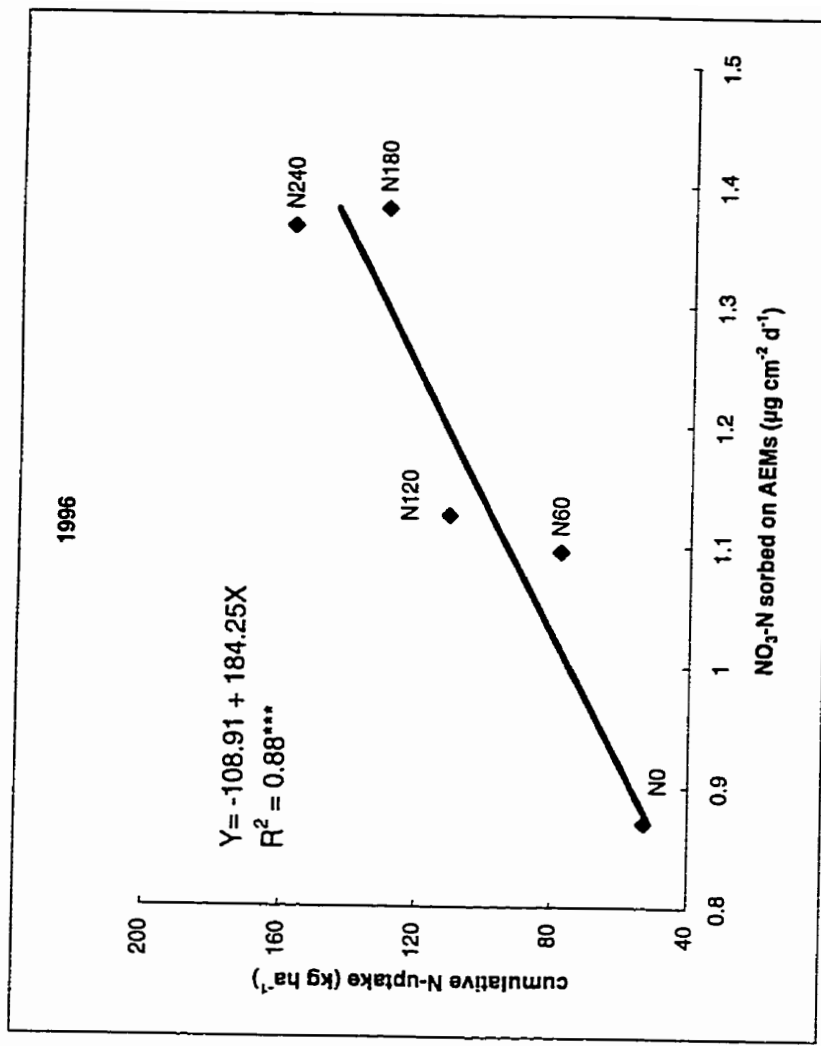
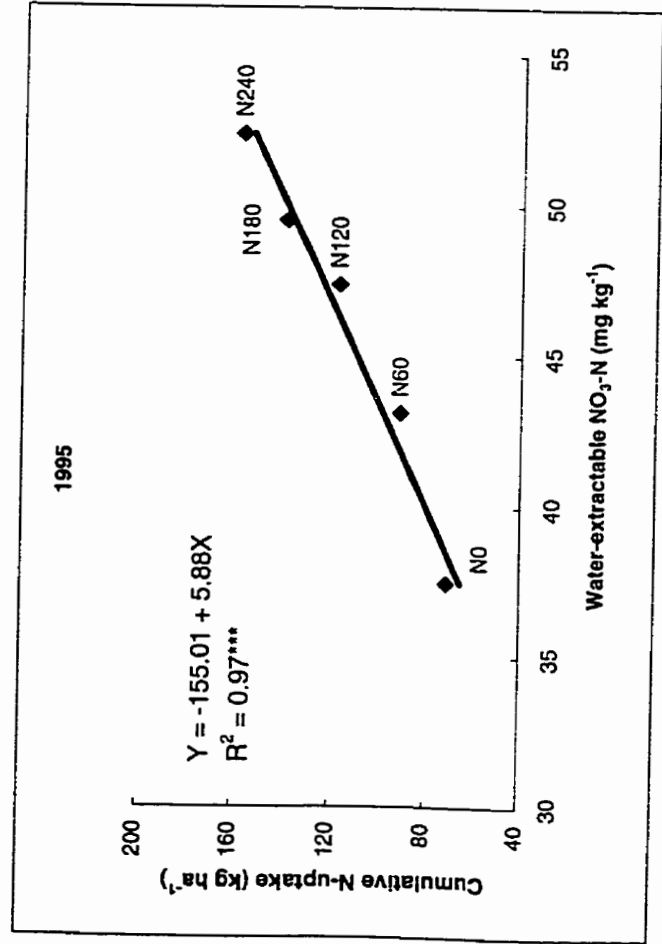
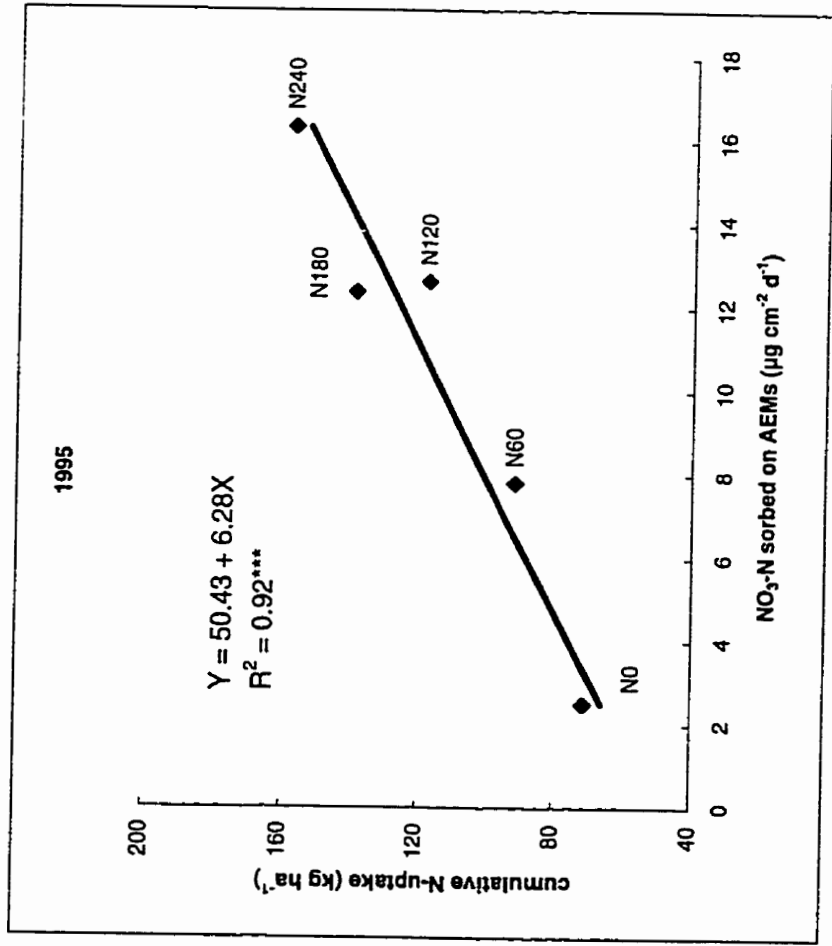


Figure 5



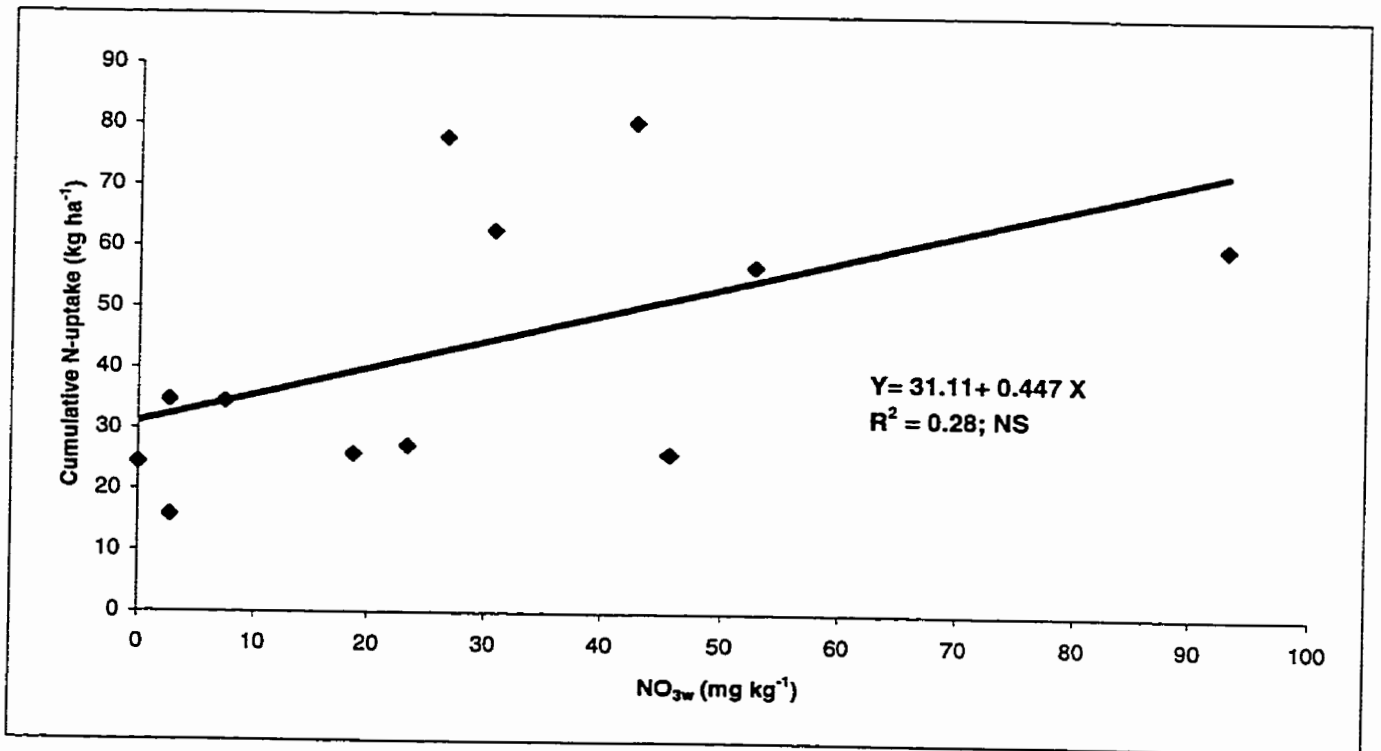
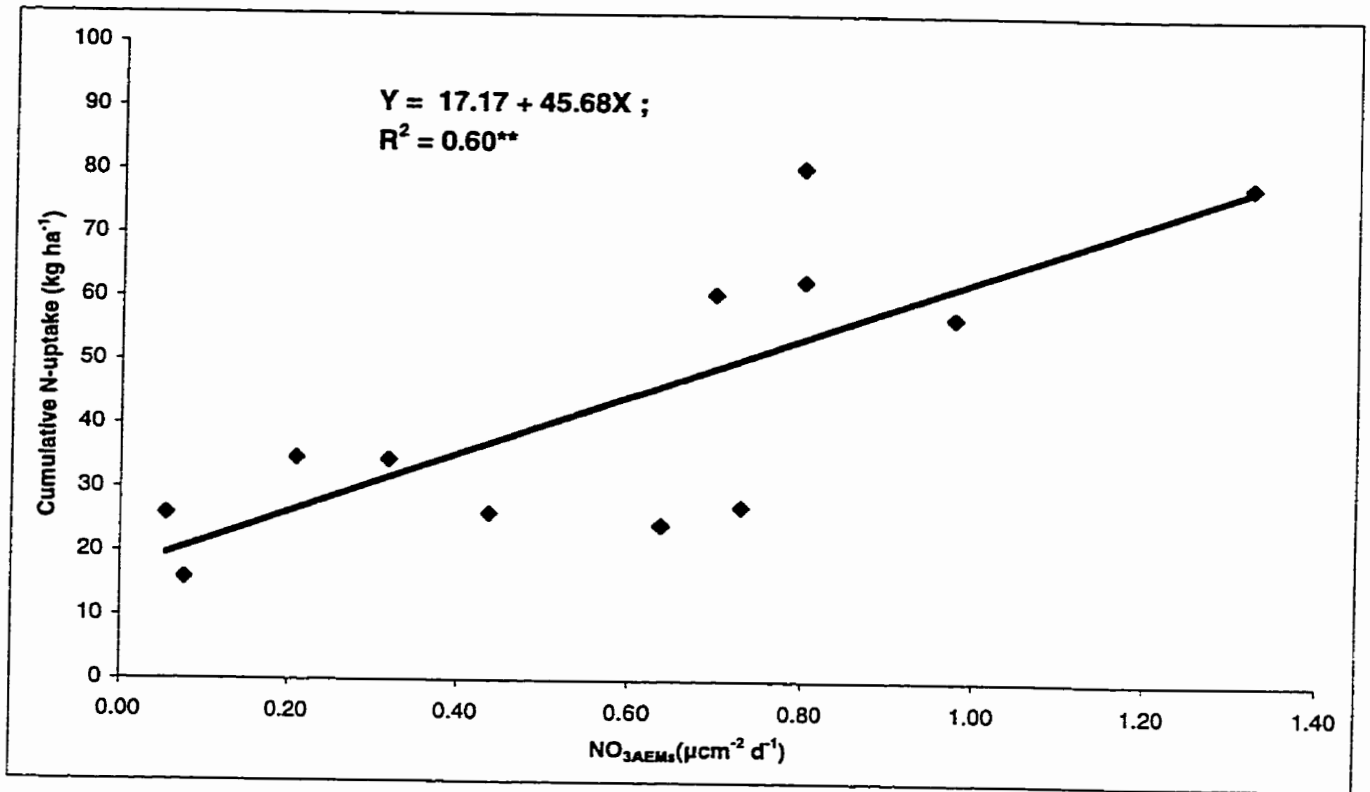


Figure 6

Le chapitre III a concerné l'examen du potentiel des membranes d'échange anionique (AEMs) à mesurer la disponibilité des  $\text{NO}_3\text{-N}$  pour les fourrages produits dans l'Ouest de la province de Québec. Il a été démontré que l'utilisation des AEMs pour prédire la disponibilité de N aux fourrages est une méthode plus spécifique et plus précise que les extractifs chimiques, notamment, l'extraction à l'eau. Par ailleurs, la disponibilité de N aux plantes est affectée par plusieurs facteurs et il est primordial de maximiser l'utilisation efficace des fertilisants azotés afin d'augmenter les profits et de diminuer les risques de pollution environnementale. Il est alors indispensable d'avoir un outil efficace permettant de prédire adéquatement la disponibilité de N aux fourrages. Le chapitre suivant démontre l'effet de la fertilisation azotée sur le rendement et la qualité des fourrages produits en Abitibi-Témiscamingue. Il vise également à démontrer que les nitrates extraits avec les membranes pourraient être utilisés comme critère de prédiction des besoins en N des fourrages produits dans la région à l'étude.



## **CHAPITRE IV**

**RÉPONSE DES FOURRAGES À LA FERTILISATION AZOTÉE EN RELATION  
AVEC LA TENEUR DU SOL EN NITRATES MESURÉE PAR LES  
MEMBRANES D'ÉCHANGES ANIONIQUES (AEMs)**

## RÉSUMÉ

La disponibilité de l'azote (N) du sol est un important facteur influençant la production des graminées fourragères. Par ailleurs, il est important de maximiser l'efficacité des fertilisants azotés afin d'augmenter les profits et de diminuer les risques de contamination des eaux souterraines par l'azote apporté. Les objectifs de cette étude étaient: (i) déterminer l'effet de la fertilisation azotée sur le rendement, le prélèvement en N et la qualité des fourrages produits dans l'Ouest Canadien et (ii) comparer l'utilisation du test des nitrates dosés avec les membranes d'échange anionique utilisées *in situ* ( $\text{NO}_{3\text{AEMs}}$ ) à celui dosé avec l'eau ( $\text{NO}_{3\text{w}}$ ) comme seule critère de prédiction des besoins en N des fourrages. La réponse des fourrages à différentes doses de  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  (0 à 240 kg N ha<sup>-1</sup>) dans des sols argileux (gleysols humiques) a été étudiée de 1994 à 1996 sur quatre sites de la région de l'Abitibi-Témiscamingue (Québec, Canada). Des modèles quadratiques ou linéaires ont été utilisés afin de décrire la réponse des fourrages à la fertilisation azotée. L'azote a significativement ( $P < 0.001$ ) augmenté le rendement des fourrages ainsi que leur prélèvement en N et leur teneur en  $\text{NO}_3\text{-N}$ . En moyenne, le rendement saisonnier en M.S. était de 2,7 Mg ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup> sans N et de 5,2 Mg ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup> avec une fertilisation de 240 kg N ha<sup>-1</sup>. La teneur des fourrages en  $\text{NO}_3\text{-N}$  a été inférieure à la teneur maximale admissible de 1,5 g kg<sup>-1</sup> même à la dose la plus élevée de N. Le taux de fertilisation économiquement optimum (Nop), dépendant des sites et des années, a varié de 25 à 240 kg N ha<sup>-1</sup> et a une moyenne de 125 kg N ha<sup>-1</sup>. Cette étude a indiqué que des quantités élevées de N sont nécessaires pour atteindre un rendement économique dans la région d'étude.  $\text{NO}_{3\text{AEMs}}$  prédit mieux le rendement relatif ( $R^2 = 0,60$ ) et le (Nop) ( $R^2 = 0,45$ ) que le  $\text{NO}_{3\text{w}}$  ( $R^2 = 0,08$ ). Basé uniquement sur la relation entre le rendement relatif et la teneur du sol en nitrates au printemps, la teneur en  $\text{NO}_{3\text{AEMs}}$  prédit mieux que les  $\text{NO}_{3\text{w}}$  les besoins en N des fourrages produits sous ce climat continental frais.

**Mots-clés:** Fertilisation azotée, nitrate, fourrage, N économique

**Titre abrégé:** Fertilisation azotée des fourrages et la teneur du sol en nitrate

**Auteurs:** N. Ziadi, R. R. Simard, G. Allard et G. Parent

Soumis pour publication dans la revue canadienne de la science du sol

**Yield response of forage grasses to N fertilizer as related to spring soil nitrate sorbed  
on Anionic Exchange Membranes**

**ABSTRACT**

Soil nitrogen (N) availability is an important factor in forage grass production. It is important to maximise N fertilizer efficiency to improve farm profitability and to reduce the environmental risk with excess N. The objectives of this study were: (i) to determine the effects of N fertilizer on yield, N uptake and  $\text{NO}_3\text{-N}$  concentration of forage grasses produced in Western Quebec; and (ii) to compare the use of spring soil nitrate measured by Anionic Exchange Membranes ( $\text{NO}_{3\text{AEMs}}$ ) and by water extraction ( $\text{NO}_{3\text{w}}$ ) as a single criterion to predict fertilizer N requirements of forage grasses. The yield response of grasses to different rates of  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  (0 to 240 kg N  $\text{ha}^{-1}$ ) on heavy clay soils (Humic Gleysols) was studied from 1994 to 1996 at four sites in the Abitibi-Temiscamingue area, Quebec (Canada). Quadratic or linear models were used to describe forage response to N fertilizer. Nitrogen significantly ( $P < 0.001$ ) increased forage yield, N-uptake and  $\text{NO}_3\text{-N}$  concentration. On average, seasonal DM yields were 2.7 Mg  $\text{ha}^{-1}\text{yr}^{-1}$  without N and 5.2 Mg  $\text{ha}^{-1}\text{yr}^{-1}$  with 240 kg N  $\text{ha}^{-1}$ . The forage  $\text{NO}_3\text{-N}$  concentration was generally less than the maximum safe level of 1.5 g  $\text{NO}_3\text{-N kg}^{-1}$  even at the highest N application rates. The economic optimum fertilizer rate (Nop) for forage yield varied from 25 to 240 kg N  $\text{ha}^{-1}$  depending on sites and years, and averaged 125 kg N  $\text{ha}^{-1}$ . This study indicated that large amounts of fertilizer N will be needed to achieve economic yield of forage grasses in the area. The  $\text{NO}_{3\text{AEMs}}$  predicted a larger proportion of forage relative yield ( $R^2 = 0.60$ ) and Nop ( $R^2 = 0.45$ ) than  $\text{NO}_{3\text{w}}$  ( $R^2 = 0.08$ ). Based only on the relationship between the relative yield and spring soil nitrate,  $\text{NO}_{3\text{AEMs}}$  could be used as a single criterion for fertilizer N recommendation of forage grasses in a cool continental climate.

**Key words:** N fertilizer, nitrate, grass, Nop.

**Short title:** Forage N fertilization and soil nitrate content

## INTRODUCTION

Nitrogen is often considered the most important limiting factor especially for non legume species. High crop yields often require additional N as inorganic N fertilizer or manure. However, the improper use of N fertilizer on meadows may result in water contamination by N transfer from soil and air pollution via denitrification or  $\text{NH}_3$  volatilization. Indeed, nitrate ( $\text{NO}_3^-$ ) is known as the most common agricultural pollutant of surface and ground waters (Knox and Moody 1991). The plowing of old meadows or over fertilized land may result in large  $\text{N}_2\text{O}$  emissions (Wagner-Riddle et al. 1997). In addition, N fertilizer influence forage quality and there is a considerable risk for application of more fertilizer N than the crop requires (Prins 1984). Therefore, the need for a reliable prediction of N availability in soils has increased due to economic and environmental considerations. This is a prerequisite to the optimal use of soil available N in crop production.

Fertilizer N recoveries by crops under field conditions rarely exceed 50 to 60% even when soil immobilization is taken into account (Roth and Fox 1990; Bock and Hergert 1991). Studies conducted in Quebec on corn reported that fertilizer N recoveries are about 40 to 65% of applied N (Isfan et al. 1995; Tran et al. 1997).

Several methods, based on chemical extraction of soil, have been used to determine soil N availability to crops. Although, such methods have proven useful, they presented some disadvantages (Bundy and Meisinger 1994; Skogley and Dobermann 1996). Indeed, they are limited in their ability to accurately measure nutrient forms that are truly plant available. Recently, the use of Anionic Exchange Membrane (AEMs) as a tool for estimating soil N availability to different crops has shown promising results and have many practical advantages over chemical extractions (Jowkin and Schoenau 1998; Simard et al. 1998; Ziadi and Simard 1998). This method may help to precise the fertilizer N need of grass forage species.

The pre-seeding soil N test has long been recommended as a method of assessing N availability and predicting fertilizer N needs for different crops, especially for corn (*Zea mays* L.) in sub-humid areas in the western USA and Canada (Magdoff et al. 1984; Hergert 1986; Zebarth and Paul 1996). In Quebec, the use of soil test  $\text{NO}_3^-$  is still limited and only few studies were mainly carried out on corn and wheat (Giroux et al. 1993). For grass forage, N

management is complex and many factors must be considered (Whitehead 1995). Many studies have been conducted on the effect of N on grass forage yield and quality in Canada (MacLeod 1965; Hunt et al. 1979; Bélanger et al. 1989; Bélanger and Richards 1997). However, most of the studies did not include soil N measurements (Bittman and Kowalenko 1998). The objectives of this study were (i): to determine the effects of N fertilizer on grass forage yield, quality and N uptake produced in Western Quebec; and (ii) to compare the use of spring soil nitrate measured by Anionic Exchange Membranes ( $\text{NO}_3^{\text{AEMs}}$ ) to water ( $\text{NO}_3^{\text{w}}$ ) as a criterion to predict fertilizer N requirements of forage.

## MATERIALS AND METHODS

### Field Study and Treatments

Field experiments were conducted from 1994 to 1996 at four sites in the Abitibi-Temiscamingue region, province of Quebec, Canada. Details about the experiment are reported by Ziadi et al. (1999). Briefly, sites were chosen in 1993 from farmer's fields; timothy (*Phleum pratense* L.) was the main grass specie whereas orchard grass (*Dactylis glomerata* L.) dominated at Ste-Gertrude. During the three growing seasons, the four sites are referred as S1 to S4 in 1994, S5 to S8 in 1995 and S9 to S12 in 1996. Treatments consisted of  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  applied at 0, 60, 120, 180, and 240 kg N  $\text{ha}^{-1}$  and are referred in the text as N0 to N240. The P and K fertilizers were applied according to the Mehlich III soil test and local recommendations (Conseil des Productions Végétales du Québec 1994). Fertilizers were broadcasted by hand; half of the amount was applied in early spring and the other half after the first cut.

### Plant Harvest and Analysis

The forage was harvested twice a year from a 1.8  $\text{m}^2$  area using a plot harvester at a cutting height of 6 cm. A 500 g sub-sample was dried at 55°C for dry matter determination. Plants were analysed for their total N and  $\text{NO}_3\text{-N}$  contents. The total N concentration was determined by colorimetry following a wet digestion with  $\text{H}_2\text{O}_2$  and  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (Richards 1993). Water soluble nitrate in plants was determined according to Cataldo et al. (1975). Seasonal forage DM yield was calculated by adding forage DM

yields from the first and second cut. Nitrogen uptake was calculated by multiplying forage DM yield by the N concentration in the whole plant tissue.

### Soil analysis

Soils used in this study have high clay and organic matter contents. Some physical and chemical characteristics are reported by Ziadi et al. (1999). Composite soil samples (0-15 cm layer, 10 cores per plots) were taken on 24 May 1995 and 22 May 1996. The soil  $\text{NO}_3^-$  content was measured by extraction in distilled water ( $\text{NO}_{3w}$ ) with a soil: water ratio of 1:10 and 30 min shaking. The soil  $\text{NO}_3^-$  content was also determined *in situ* by Anionic Exchange Membranes ( $\text{NO}_{3\text{AEMs}}$ ) as described in details in chapter three.

### Statistical Analyses

Analysis of variance (ANOVA) was performed on all measured parameters by the GLM procedure of SAS (SAS Institute 1990). All experimental error variances were tested for homogeneity using Bartlett's test (Steel and Torrie 1980). Orthogonal contrasts were calculated to determine the significance of linear or quadratic components of the forage N response on yield, N uptake and  $\text{NO}_3\text{-N}$  content.

To determine the economically optimum fertilizer rate (Nop), polynomial N response curves were computed for seasonal forage DM yields on each site during the three growing seasons. The dependent variable was seasonal forage DM yield and the independent variable was N fertilizer rates. All calculations were performed according to Heady et al. (1961). The Nop was assumed to be the rate of N application where one dollar of N fertilizer yielded one dollar of forage. This analysis assumes that fertilizer N is the only variable cost and all other costs are fixed. The Nop was calculated by setting the first partial derivative of the N response curve equal to the ratio between the cost of fertilizer and the price of forage. The following polynomial equation was used to describe the yield response as a function of applied N:

$$Y = a + bX + cX^2 \quad (1)$$

where Y is seasonal DM production yield, X the N fertilizer rate, and a, b, and c are regression parameters.

The first partial derivative of the response curve is given by:

$$\frac{dY}{dX} = b + 2cX = CP \quad (2)$$

which is equalled to CP, the ratio of the cost of N fertilizer (1.14\$ kg<sup>-1</sup> N ) to the price of forage (\$85 tonne<sup>-1</sup> ).

Equation 2 is solved for X which is set equal to N<sub>op</sub>:

$$N_{op} = \frac{(CP - b)}{2c} \quad (3)$$

The same polynomial equation was used to calculate the maximum yield (N<sub>max</sub>). The equation (2), however, is set up to be equal to zero and N<sub>max</sub> is given by:

$$N_{max} = \frac{-b}{2c} \quad (4)$$

The maximum seasonal DM yield (Y<sub>op</sub> ) was also estimated by using N<sub>op</sub> as X in equation 1. The relative yield was calculated by dividing the estimated seasonal DM yield without N ( parameter 'a' in equation 1 ) by the predicted maximum seasonal DM yield.

The N<sub>max</sub>, N<sub>op</sub> and Y<sub>op</sub> values could not be determined by the quadratic model when the fitted parameter 'c' had a positive value (Colwell 1994). Thus, a linear model (Y = a +b X), which better described the yield-fertilizer N relationship, was used at two sites in 1996. In addition, when the calculated N<sub>max</sub> or N<sub>op</sub> values were greater than 240 kg N ha<sup>-1</sup>, a value of 240 kg ha<sup>-1</sup> was used (Colwell 1994).

Since the field evaluation of AEMs was only conducted during 1995 and 1996, the possibility of using spring soil NO<sub>3</sub><sup>-</sup> as a single criterion to predict fertilizer N requirement for forage was only evaluated for these two cropping seasons. Thus, the amounts of NO<sub>3</sub><sup>-</sup> in spring 1995 and 1996 as determined by water and AEMs were related to N<sub>op</sub> at each site by a simple

linear regression analysis. Using the same approach, a relationship was established between the relative yield and  $\text{NO}_3\text{AEM}_6$  and  $\text{NO}_3\text{w}$ .

## RESULTS AND DISCUSSION

### Effect of N Fertilizer on Yields, N Uptake, and Forage $\text{NO}_3\text{-N}$ Concentration

Nitrogen significantly increased ( $P < 0.001$ ) seasonal forage DM yields, N uptake and  $\text{NO}_3\text{-N}$  content (Table 1, Fig.1). Linear and quadratic responses were obtained as shown by the significant contrasts in Table 1. When results are presented by site, a significant DM increase was obtained in all sites except at Ste-Gertrude site in 1994 (Fig.1). There was an increase trend of DM yield with increasing N fertilizer at this site. On average, the seasonal DM yield was  $2.7 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$  without N and  $5.2 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$  with  $240 \text{ kg N ha}^{-1}$ . The positive influence of N fertilizer inputs on forage growth has been reported in many studies and its effect is apparent in several aspects of forage morphology and physiology (Whitehead 1995). Forage grasses are highly responsive to N fertilizers and researchers in Eastern Canada reported increases in forage yields after N application (MacLeod 1965; Bélanger et al. 1989; Bélanger and Richards 1997).

The lack of significant grass response to fertilizer N at Ste-Gertrude in 1994 may be explained by the prevailing environmental conditions in this site. Indeed, total precipitation from May 1 to June 30 (Table 2) was higher in 1994 than in 1995 and 1996 (168, 144, and 105 mm for 1994, 1995, and 1996, respectively) and was near the long-term average (176 mm). Since cumulative N uptake from the control (N0) at Ste-Gertrude was higher in 1994 ( $89 \text{ kg N ha}^{-1}$ ) than in 1995 ( $43 \text{ kg N ha}^{-1}$ ) and 1996 ( $28 \text{ kg N ha}^{-1}$ ), the low positive response to N fertilizer may also be partially explained by the enhanced soil N mineralization potential in 1994 under higher available water from rainfall than 1995 and 1996 (Zebarth and Paul 1996). The more significant responses obtained at Ste-Gertrude in 1995 and 1996 can also be related to a depletion in soil mineralizable N content since previous nutrient management at that site included no manure or fertilizer application since 1989.

Nitrogen uptake linearly increased with increasing N fertilizer rates (Tables 1 and 3). The highest N uptake was obtained at  $240 \text{ kg N ha}^{-1}$ . On average, N uptake varied between 53



kg N ha<sup>-1</sup> in the control and 162 kg N ha<sup>-1</sup> with N240. The seasonal N uptake continued to increase with high N rates even though maximum DM yield was reached. This explains the large increase in forage NO<sub>3</sub><sup>-</sup> concentration at the highest N rates (Table 3) and the significant quadratic component for NO<sub>3</sub><sup>-</sup> concentration (Table 1). The significant linear increase in forage N uptake with fertilizer N application is consistent with other studies (Kline and Broersma 1983; Whitehead 1995; Bittman and Kowalenko 1998). The lowest N uptake was obtained in the control treatment at all sites and in all years. It was 80, 71, and 53 kg N ha<sup>-1</sup> in 1994, 1995 and 1996 respectively. These results can be explained by the prevailing environmental conditions observed in 1996 and by a progressively smaller soil N pool as no input was made on these plots from 1994 to 1996. Total precipitation was higher in 1994 than in 1995 and 1996 at all sites (Table 2).

The N fertilizer addition has also increased the forage NO<sub>3</sub>-N content (Table 1). The NO<sub>3</sub>-N levels in grass tissues increased in each site with increasing N fertilizer rates (Table 3), with the largest contents observed when 240 kg N ha<sup>-1</sup> was applied. The significant increase in forage NO<sub>3</sub>-N content following N application is consistent with other studies (Wright and Davidson 1967; Gillingham et al. 1969). In most cases, NO<sub>3</sub>-N content was lower than the minimum safe level for animal consumption of 1.5 g kg<sup>-1</sup> reported in the literature (Ryan et al. 1972; Wright and Davidson 1964; Whitehead 1995). The NO<sub>3</sub>-N content ranged from 0.6 g kg<sup>-1</sup> without N fertilizer to 1.4 g kg<sup>-1</sup> with the highest N applied (Table 3). Forage nitrate contents greater than the maximum safe level for animal consumption were observed at Lorrainville (2 g kg<sup>-1</sup>) with N240. These values, however, remain less than the level of 6 g kg<sup>-1</sup> which is considered as toxic (Wright and Davidson 1964; Gillingham et al. 1969).

The relatively low NO<sub>3</sub>-N contents observed with N240 are not surprising since timothy was the main specie in our study. Indeed, forage nitrate concentration is affected by species (Gillingham et al. 1969; Kline and Broersma 1983; Whitehead 1995) and timothy was reported to not accumulate NO<sub>3</sub>-N to levels of possible nitrate poisoning even at high rates of N fertilizer (Kline and Broersma 1983).

### **Economically Optimum N Fertilizer Rate**

The economically optimum fertilizer rate (Nop) was calculated for seasonal DM yield at each site from 1994 to 1996 (Table 4). Nop varied with sites and years. It ranged from 25 kg N ha<sup>-1</sup> at Ste-Gertrude in 1994 to 240 kg N ha<sup>-1</sup> at Palmarolle and Laverlochere in 1996. The low Nop obtained in 1994 at the Ste-Gertrude site may be explained by climatic conditions obtained in 1994 as stated earlier (Table 2). High precipitation obtained in 1994 probably stimulated soil N mineralization in this site and restricted the response to N fertilizer. The soil N mineralization potential has been shown to be affected by climatic factors such as temperature and moisture (Cassman and Munns 1980; Ellert and Bettany 1992).

On average (sites and years confounded), Nop was 126 kg N ha<sup>-1</sup>; this value is higher than the value currently recommended for grass forage in Québec (110 kg N ha<sup>-1</sup>; CPVQ 1996). It ranged from 82 kg N ha<sup>-1</sup> in 1994 to 201 kg N ha<sup>-1</sup> in 1996. The higher Nop obtained in 1996 may be partly explained by the high Nop obtained at Palmarolle, Lacherlochere and Lorrainville and by the prevailing climatic conditions. Indeed, total precipitation in May 1996 at these sites was 52, 44 and 44% of the long-term average respectively (Table 2). This low precipitation may have limited crop growth and soil N mineralization. The mineralizable N pool may also have been progressively depleted by the plant N uptake without fertilizer inputs. Some studies, however, showed the evidence that more N is required under wet than dry conditions to reach maximum yield (Whitehead 1995; Holford et al. 1997). The difference between the results of the present study and previously reported information may be partly explained by the complex interaction between water and N fertilization.

The N rate required to reach maximum yield (Nmax) was calculated for all sites and years (Table 4). Larger variation and higher amounts were, however, obtained with Nmax than with Nop. Nmax varied between 180 and 240 kg N ha<sup>-1</sup>. On average, Nmax was about 225 kg N ha<sup>-1</sup>. A large variation between Nmax within sites was also observed.

### **Relationship Between Nop, Relative Yield and Soil NO<sub>3</sub>-N Content**

The relationship between Nop and soil NO<sub>3</sub><sup>-</sup> as extracted by Anionic Exchange Membranes (NO<sub>3</sub>AEMs) and water (NO<sub>3w</sub>) in spring 1995 and 1996 is presented in Fig. 2. When

Nop was expressed as a function of spring soil  $\text{NO}_{3\text{AEM}_5}$  to a 15 cm depth, about 45% of the Nop variability was accounted for (Fig.2). However, when  $\text{NO}_{3\text{w}}$  was used Nop was poorly related ( $R^2 = 0.08$ ) to the amount of spring soil  $\text{NO}_3^-$ . Based on a relationship between soil  $\text{NO}_3^-$  extracted by KCl and Nop, Bélanger et al. (1998) concluded that conventional spring soil  $\text{NO}_3^-$  tests are inappropriate for predicting fertilizer N requirements of wheat in Atlantic Canada. However, Zebarth and Paul (1996) recommended the use of a soil nitrate test in early to mid-June in order to determine if additional fertilizer N was required for silage corn produced in South Coastal British Columbia. In a study conducted in Australia, Holford et al. (1997) supported the use of spring soil nitrate test to determine the N requirement of sorghum. These differences in results, generally reported in the literature, may be explained by differences in climatic conditions.

The relationship between grass relative yield and soil  $\text{NO}_3^-$  contents as determined by Anionic Exchange Membranes ( $\text{NO}_{3\text{AEM}_5}$ ) and water ( $\text{NO}_{3\text{w}}$ ) in springs of 1995 and 1996 is presented in Fig. 3. This relationship was typically curvilinear and about 60% of the variability were accounted for with  $\text{NO}_{3\text{AEM}_5}$  (Fig.3). Close relationships between soil  $\text{NO}_3^-$  in spring and the response to N fertilizers of crops have been reported in many studies (Magdoff et al. 1984; Dahnke and Johnson 1990; Holford et al. 1997). However, other studies indicated that this approach is not satisfactory under cool-humid environments (Neeteson 1995; Bélanger et al. 1998; Bittman and Kowalenko 1998). Therefore, an index to predict the N fertilizer requirement may be developed specifically for a given region.

When soil was extracted by water, however, no relationship between grass relative yield and soil  $\text{NO}_{3\text{w}}$  content was observed (Fig. 3). This indicates that  $\text{NO}_3^-$  extracted by AEMs better described soil N availability to forage grass than  $\text{NO}_3^-$  extracted by water. It is well known that a good soil test should be able to predict the amount of plant available nutrient as well as the fertilizer responsiveness of plants. The results of our study on the relationship between the amount of N available by AEMs and forage N uptake (Ziadi et al. 1999) and relative yield (in this chapter) indicate that AEMs would be suitable as soil testing procedures for forage produced in Eastern Canada. Other studies indicated that AEMs provide more precise indices of soil N availability than chemical extraction (Paré et al. 1995; Jowkin and Schoenau 1998).

The relative forage yield was much closer related to  $\text{NO}_3\text{AEM}_6$  than to water-soluble  $\text{NO}_3^-$  content. These results may be related to the fact that AEMs can act as a sink for  $\text{NO}_3^-$  submitted to the *in situ* soil conditions for a defined lapse of time while chemical extraction (*i.e.* water) only monitors a static concentration in a specific pool (Yang et al. 1991). Our finding is supported by those of Dahnke and Johnson (1990) who recommended the use of fluxes as indices to soil N-availability to plants in cold-humid environments.

## CONCLUSIONS

This study indicates that fertilizer N recommendations for grasses presently in use in Quebec underestimate the N needs of forage in the Abitibi-Temiscamingue area. About 125 kg N ha<sup>-1</sup> would be necessary for the potential economic yield. This is probably related to the cool soil conditions that restrict soil N mineralization in early spring. This shortage of soil N has to be compensated by additional fertilizer to reach the optimal economic yield of the first cut of hay. The results also indicate that the *in situ* use of AEMs better predict forage response to fertilizer N than a static water extraction of soil N. The AEM method has methodological advantages over chemical extractions such as avoiding the steps of weighing and grinding the soil. A further evaluation of the procedure in other pedoclimatic environments is, however, needed before its adoption as N soil-test for forages in eastern Canada.

## ACKNOWLEDGMENTS

The research was supported by the Agriculture Canada trials and Research in Agri-Food Program (Project # Ae-081). The help of J. Lafond, N. Olivier, and C. Lafrenière in every part of the project is greatly appreciated. We also thank G. Bélanger for fruitful discussions during the interpretation of these results.

## REFERENCES

- Bélanger, G. and Richards, J. E. 1997.** Growth analysis of timothy grown with varying N nutrition. *Can. J. Plant Sci.* **77**: 373-380.
- Bélanger, G., Richards, J. E. and Walton, R. B. 1989.** Effects of 25 years of N, P and K fertilization on yield, persistence and nutritive value of a timothy sward. *Can. J. Plant Sci.* **69**: 501-512.
- Bélanger, G., Richards, J. E., Milburn, P. and Walker, D. 1998.** Influence of previous cropping practices on the response of spring wheat to applied N. *Can. J. Soil Sci.* **78**: 267-273.
- Bittman, S. and Kowalenko, C. G. 1998.** Whole-season grass response to and recovery of nitrogen applied at various rates and distributions in a high rainfall environment. *Can. J. Plant Sci.* **78**: 445-451.
- Bock, B. R. and Hergert, G. W. 1991.** Fertilizer nitrogen management. Pages 139-164 *in* R. F. Follett, D.R. Keeney and M. R. Cruse eds. *Managing nitrogen for groundwater quality and farm profitability.* SSSA, Madison, WI, USA.
- Bundy, L. G. and Meisinger, J. J. 1994.** Nitrogen availability indices. Pages 951-978 *in* S. H. Mickelson, ed. *Methods of soil analysis. Part 2. Microbiological and biochemical properties.* SSSA. Madison, WI.
- Cassman, K. G. and Munns, D. N. 1980.** Nitrogen mineralisation as affected by soil moisture, temperature and depth. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **44**: 1233-1237.
- Cataldo, D. A., Haroon, M., Schrader, L. E., and Youngs, V. L. 1975.** Rapid colorimetric determination of nitrate in plants tissue by titration of salicylic acid. *Commun. Soil Sci. Plant Ana.* **6**: 71-80.
- Colwell, J. D. 1994.** *Estimating Fertilizer Requirements. A quantitative Approach.* UK: Cab International; 262 p.
- Conseil des Productions Végétales du Québec. 1994.** *Grilles de Références en Fertilisation.* Agdex 540. Gouvernement du Québec, Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation. 128p.
- Dahnke, W. C. and Johnson, G. V. 1990.** Testing soils for available nitrogen. Pages 127-139 *in* R. L. Westerman, ed. *Soil testing and plant analysis.* SSSA Book Series.
- Ellert, B. H. and Bettany, J. R. 1992.** Temperature dependence of net nitrogen and sulfur mineralization. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **56**: 1133-1141.

- Fageria, N.K., Baligar, V.C and Jones, C.A. 1997.** Field crops and mineral nutrition. Pages 1-10 in Growth and mineral nutrition of field crops. Marcel Dekker, New York, NY.
- Gillingham, J. T., Shier, M. M., Starnes, J.J., Page, N. R., and McClain, E. F. 1969.** Relative Occurrence of toxic concentration of cyanide and nitrate in varieties of Sudangrass and Sorghum-Sudangrass hybrids. *Agron. J.* **61**: 727-730.
- Giroux, M., Tran, T.S., Lemieux, C. and Audesse, P. 1993.** Utilisation du test des nitrates du sol en vue d'une recommandation d'azote pour les céréales. *Agrosol.*(2):3-5.
- Heady, E. O., Pesek, J. T., Brown, W. G. and Doll, J. P. 1961.** Crop response surfaces and economic optima in fertilizer use. Chapter 14 in *Agricultural production functions*. Iowa State Press, Ames, IA.
- Hergert, G. W. 1986.** Nitrate leaching through sandy soil as affected by sprinkler management. *J. Environ. Qual.* **5**: 272-278.
- Holford, I. C. R., Holland, J. F., Good, A. J., and Leckie, C. 1997.** Yield and protein responses to nitrogen, and nitrogen fertiliser requirements of grain sorghum, in relation to soil nitrate levels. *Aust. J. Agric. Res.* **48**: 1187-97.
- Hunt, I. V., Frame, J. and Harkess, R. D. 1979.** The effect of date of primary growth harvest and levels of nitrogen and potassium fertilizers on the dry matter production of timothy (*Phleum pratense* L.). *Grass Forage Sci.* **34**: 131-137.
- Isfan, D., Zizka, J., D'Avignon, A. and Deschênes, M. 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.
- Jowkin, V. and Schoenau, J. J. 1998.** Impact of tillage and landscape position on nitrogen availability and yield of spring wheat in the Brown soil zone in southwestern Saskatchewan. *Can. J. Soil Sci.* **78**: 563-572.
- Kline, P. and Broersma, K. 1983.** The yield, nitrogen and nitrate content of reed canarygrass, meadow foxtail and timothy fertilized with nitrogen. *Can. J. Plant Sci.* **63**: 943-950.
- Knox, E. and Moody, D. W. 1991.** Pages 19-56 in R. F. Follett, D.R. Keeney and M. R. Cruse eds. *Managing nitrogen for groundwater quality and farm profitability*. SSSA, Madison, WI, USA.
- MacLeod, L. B. 1965.** Effect of nitrogen and potassium on the yield and chemical composition of alfalfa, bromegrass, orchard-grass and timothy grown as pure species. *Agron. J.* **57**: 261-266.
- Magdoff, F. R., Ross, D. and Amadon, J. 1984.** A soil test for nitrogen availability to corn.

Soil Sci. Soc. Am. J. **48**: 1301-1304.

**Neeteson, J. J. 1995.** Nitrogen management for intensively grown arable crops and field vegetables. Pages 295-325 *in* P.E. Bacon, ed. Nitrogen fertilization in the environment. Marcel Dekker, Inc.

**Paré, T., Gregorich, E. G. and Ellert, B. H. 1995.** Comparison of soil nitrate extracted by potassium chloride and adsorbed on an anion exchange membrane *in situ*. Commun. Soil Sci. Plant Anal. **26**: 883-898.

**Prins, W. H. 1984.** Limits of nitrogen fertilizer on grasslands. Neth. J. Agric. Sci. **32**: 318-321.

**Richards, J. E. 1993.** Chemical characterization of plant tissue. Pages 115-139. *in* M. R. Carter, ed. Soil sampling and methods of analysis. Canadian Society of Soil Science. Lewis Publishers, Boca Raton, Fl.

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

**Ryan, M., Edin, W. F. and Bryan, W. B. 1972.** Nitrate-N levels of perennial grasses affected by time and level of nitrogen application. Agron. J. **64**: 165-168.

**SAS Institute, Inc. 1990.** SAS/STAT user's guide. Version 6, 4th ed. SAS Institute Inc., Cary NC.

**Simard, R. R., Garand, M. J., and Ziadi, N. 1998.** Anion exchange membranes as tools to measure N and P mineralization from soils. p 235 *in* Agronomy abstracts. ASA, Madison, WI.

**Skogley, E.O. and Dobermann, A. 1996.** Synthetic ion-exchange resins: Soil and environmental studies. J. Environ. Qual. **25**: 13-24.

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

**Tran, T. S., Giroux, M., and Cescas, M. P. 1997.** Utilisation de l'engrais azoté marqué au <sup>15</sup>N par le maïs selon les modes d'application et les doses d'azote. Can. J. Soil Sci. **77**: 9-19.

**Whitehead, D. C. 1995.** Response to fertilizer nitrogen: Influence of weather, seasonal factors and soil type. Pages 239-252. *In* Grassland nitrogen. CAB Intern., Oxford, UK.

**Wright, M. J. and Davidson, K. L. 1964.** Nitrate accumulation in crops and nitrate poisoning in animals. Adv. Agron. **16**: 197-247.

**Yang, J. E., Skogley, E. O., Georgitis, S. J., Schaff, B. E. and Ferguson, A. H. 1991.** Phyto-availability soil test: Development and verification of theory. Soil Sci. Soc. Am. J. **55**:

**Yang, J. E., Skogley, E. O., Georgitis, S. J., Schaff, B. E. and Ferguson, A. H. 1991.** Phyto-availability soil test: Development and verification of theory. *Soil Sci. Soc. Am.J.* **55**: 1358-1365.

**Zebarth, B. J. and Paul, J. W. 1996.** Growing season nitrogen dynamics in manured soils in south coastal British Columbia: Implications for a soil nitrate test for silage corn. *Can. J. Soil Sci.* **77**: 67-76.

**Ziadi, N., and R. R. Simard. 1998.** Nitrogen Fertilizer Requirements of forage in relation to soil nitrate levels. p 235 *in* *Agronomy abstracts*. ASA, Madison, WI.

**Ziadi, N., R. R. Simard, G. Allard and J. Lafond. 1999.** Field evaluation of anion exchange membranes as a N soil testing method for grasslands. *Accepté pour publication dans la revue canadienne de la science du sol.*



## LIST OF FIGURES

**Fig. 1.** Effect of N fertilization rates on seasonal DM yield in 1994, 1995, and 1996 at the four sites. Fitted quadratic and linear curves are presented with the corresponding parameters in Tables 4.

**Fig. 2.** Relationship between the economic optimum fertilizer rate ( $N_{op}$ ) and the extractable  $NO_3-N$  present in spring at 0-15 cm depth as measured by AEMs (a) and by water (b).

**Fig. 3.** Relationship between the relative yield and the extractable  $NO_3-N$  present in spring at 0-15 cm depth as measured by AEMs (a) and by water (b).

Table 1. Analysis of variance (mean square values) for seasonal forage DM yield, N uptake and NO<sub>3</sub>-N concentration as affected by N fertilizer rates and sites

Source of variation	d. f	Seasonal DM yield (*10 <sup>6</sup> )			Seasonal N uptake (*10 <sup>3</sup> )			NO <sub>3</sub> -N content (*10 <sup>2</sup> )		
		1994	1995	1996	1994	1995	1996	1994	1995	1996
Sites (S)	3	2.15**	7.62***	5.15***	0.13	10.16***	7.81***	3.22***	0.98***	2.96***
Rep(site)	12	0.24	0.25	0.45	0.65	1.91	0.65*	0.04	0.03	0.16
Treatment (T)	4	5.69***	6.71***	12.93***	16.5***	19.41***	27.50***	7.10***	4.36***	3.05***
T * S	12	0.29	0.18	0.26	0.92	0.40	0.59	1.02***	0.26**	0.34**
Error	48		0.16	0.23		0.34	0.23			
Contrast										
T Linear	1	20.65**	25.05**	50.31***	65.71***	77.41***	109.51***	23.90***	11.84***	9.62***
T Quadratic	1	2.11*	1.71**	1.25*	0.05	0.07	0.07	4.10***	4.83***	2.45***

\*\*\*, \*\*, \* significant at P< 0.001, P<0.01 and P<0.05

Table 2. Temperature and rainfall during the three growing seasons

	Temperature (°C)					Rainfall (mm)					
	May	June	July	August	September	May	June	July	August	September	total
<b>Ste-Gertrude</b>											
1994	7.7	15.5	17.8	14.0	12.0	65	102	99	111	84	462
1995	9.0	16.7	18.2	17.1	9.1	98	46	140	39	111	435
1996	6.8	16.7	16.5	16.4	13.4	35	71	115	64	64	349
Long term monthly average (1961-90)	9.7	14.3	17.3	15.7	9.9	74	102	110	103	120	509
<b>Palmarolle</b>											
1994	7.9	15.1	17.4	14.1	11.3	38	134	96	139	105	512
1995	8.1	15.9	17.8	16.3	9.1	109	42	111	35	80	377
1996	8.6	16.3	16.1	16.4	12.8	40	71	111	84	79	385
Long term monthly average (1961-90)	9.6	14.0	17.0	15.2	9.4	77	94	95	98	107	471
<b>Laverlochere and Lorrainville</b>											
1994	9.2	16.5	18.5	14.9	12.8	61	91	100	67	76	394
1995	10.3	17.5	19.4	18.3	10.5	121	66	125	26	93	431
1996	9.3	16.9	17.0	17.3	13.8	30	65	137	73	93	397
Long term monthly average (1961-90)	10.7	14.8	18.5	16.8	11.2	67	76	75	64	102	383

Table 3. Effect of N fertilizer on cumulative forage N uptake and NO<sub>3</sub>-N content

Sites	N fertilizer rates (kg N ha <sup>-1</sup> )	N uptake (kg N ha <sup>-1</sup> )			NO <sub>3</sub> -N concentration (g kg <sup>-1</sup> )		
		1994	1995	1996	1994	1995	1996
Ste-Gertrude	0	89.34	43.26	27.76	0.70	0.79	0.71
	60	86.84	63.02	55.73	0.70	0.73	0.80
	120	114.66	78.30	88.37	0.73	0.83	0.67
	180	132.18	111.77	100.34	1.14	1.10	1.08
	240	157.72	111.66	111.88	1.30	1.71	1.49
Palmarolle	0	94.46	88.84	80.94	0.49	0.65	0.62
	60	110.78	97.80	85.49	0.62	0.60	0.50
	120	134.86	130.87	124.86	0.59	0.54	0.54
	180	121.30	142.56	124.33	0.65	0.64	0.53
	240	148.36	166.68	169.34	0.93	0.80	0.67
Laverlochere	0	81.30	82.41	64.61	0.56	0.57	0.71
	60	102.92	100.03	89.97	0.62	0.63	0.92
	120	123.28	119.11	112.37	0.69	0.68	0.95
	180	139.40	159.49	153.42	1.10	0.98	1.29
	240	158.40	165.26	175.63	1.20	1.24	1.30
Lorraineville	0	54.03	70.60	39.62	0.64	0.73	0.88
	60	91.86	104.59	80.02	0.74	0.66	0.81
	120	110.92	141.30	117.97	0.79	0.77	0.91
	180	153.22	142.77	143.68	1.60	0.91	1.29
	240	183.16	185.87	174.02	2.00	2.00	2.03
General mean	0	79.78	71.28	53.23	0.60	0.69	0.73
	60	98.10	91.36	77.80	0.67	0.65	0.76
	120	120.93	117.39	110.89	0.70	0.71	0.77
	180	136.53	139.15	130.44	1.12	0.91	1.05
	240	161.91	157.37	157.72	1.36	1.44	1.37

Table 4. Parameters of the quadratic (or linear) equation for seasonal DM yields (Y) as a function of N application rates (X) [ $Y = a + bX + cX^2$  or  $Y = a + bX$ ], Nop and the N fertilizer rate (Nmax) required to reach maximum yield

sites	a	b	c ( $\times 10^{-5}$ )	R <sup>2</sup>	Nop <sup>z</sup> (kg N ha <sup>-1</sup> )	Nmax <sup>z</sup> (kg N ha <sup>-1</sup> )	Yop <sup>y</sup> (Mg ha <sup>-1</sup> )	Relative yield <sup>x</sup> (%)
<b>1994</b>								
Ste-Gertrude (S1)	3.48	0.011	-2	0.97	25	240	4.97	0.70
Palmarolle (S2)	4.06	0.015	-4	0.88	63	188	5.47	0.74
Laverlochere (S3)	2.66	0.025	-7	0.99	107	179	4.89	0.54
Lorrainville (S4)	2.25	0.018	-3	0.96	133	240	4.84	0.46
<b>mean (1994)</b>					<b>82</b>	<b>212</b>	<b>5.04</b>	
<b>1995</b>								
Ste-Gertrude (S5)	1.93	0.012	-2	0.94	50	240	3.66	0.53
Palmarolle (S6)	3.48	0.020	-5	0.92	100	200	5.48	0.64
Laverlochere (S7)	3.21	0.017	-3	0.95	117	240	5.56	0.58
Lorrainville (S8)	2.97	0.019	-4	0.97	113	238	5.23	0.57
<b>mean (1996)</b>					<b>95</b>	<b>229</b>	<b>4.98</b>	
<b>1996</b>								
Ste-Gertrude (S9)	1.26	0.025	-6	0.99	125	208	3.86	0.33
Palmarolle (S10)	2.97	0.011	<sup>w</sup>	0.95	240	240	5.61	0.53
Laverlochere (S11)	2.69	0.015	<sup>w</sup>	0.99	240	240	6.29	0.43
Lorrainville (S12)	1.67	0.026	-4	0.99	200	240	5.61	0.30
<b>mean (1996)</b>					<b>201</b>	<b>232</b>	<b>5.34</b>	
<b>General mean</b>					<b>126</b>	<b>224</b>	<b>5.12</b>	

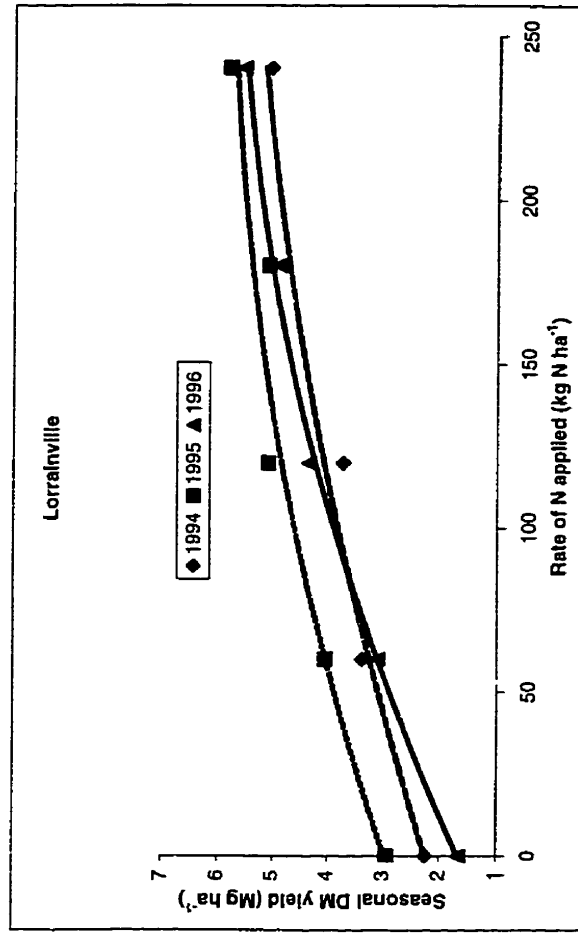
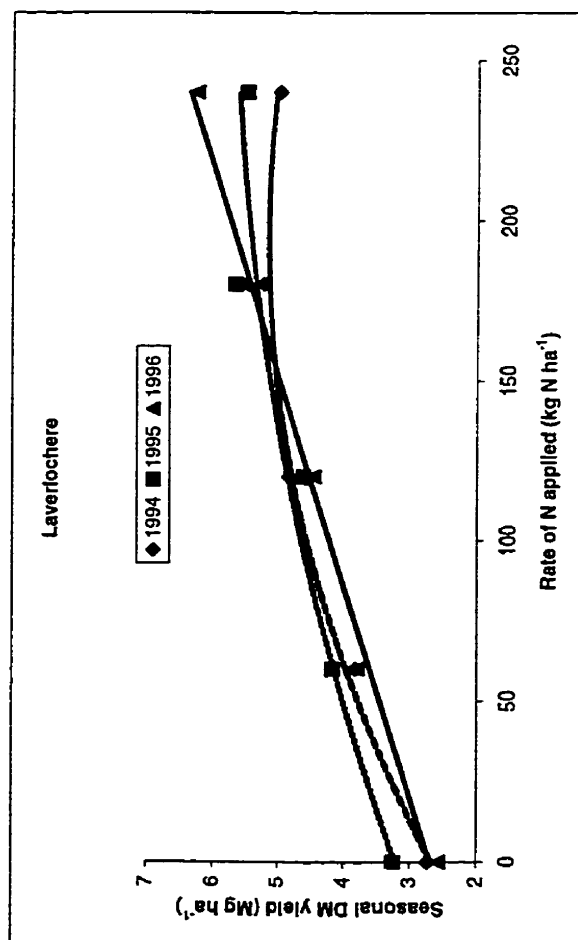
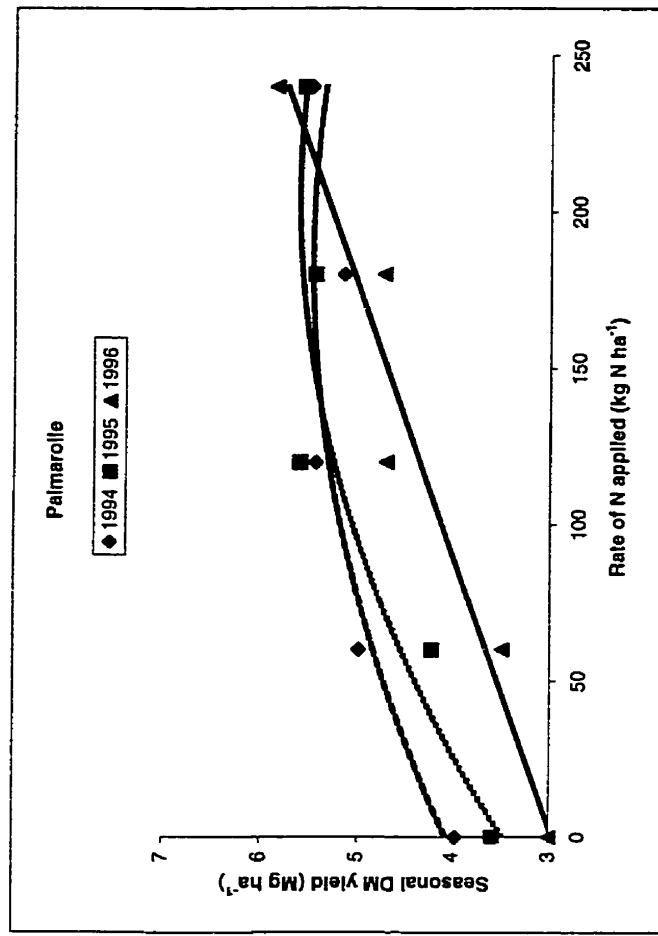
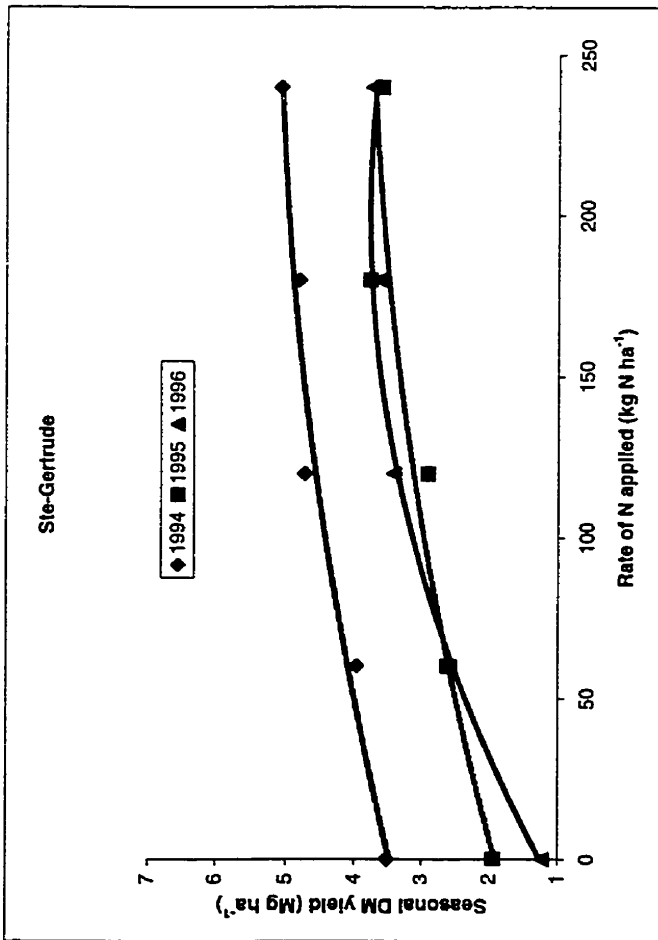
<sup>z</sup>When the Nop or Nmax values were greater than 240 kg N ha<sup>-1</sup>, a value of 240 kg N ha<sup>-1</sup> was used (Colwell 1994).

<sup>y</sup> Predicted seasonal DM yield at Nop.

<sup>x</sup> Estimated seasonal DM yield without N (a) divided by the predicted maximum seasonal DM yield.

<sup>w</sup>The Nmax, Nop, Yop and relative yield values could not be determined by a quadratic model when the fitted parameter "c" had a positive value (Colwell 1994). Thus, a linear model was used at S10 and S11.

Figure 1



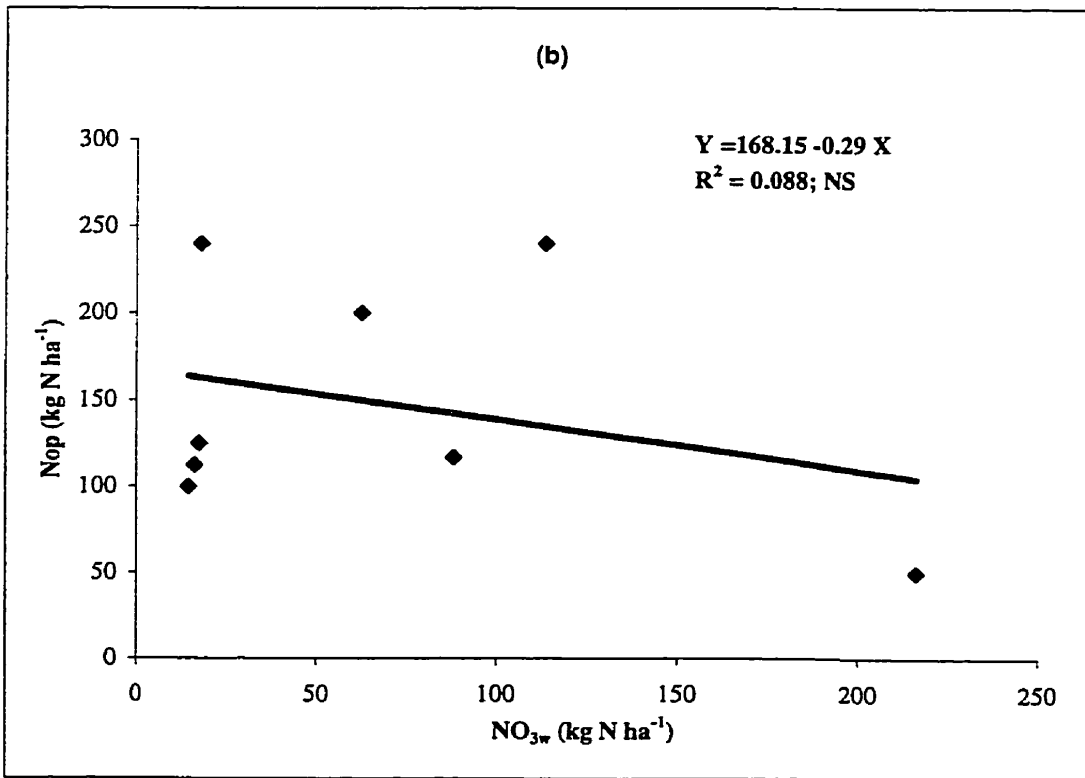
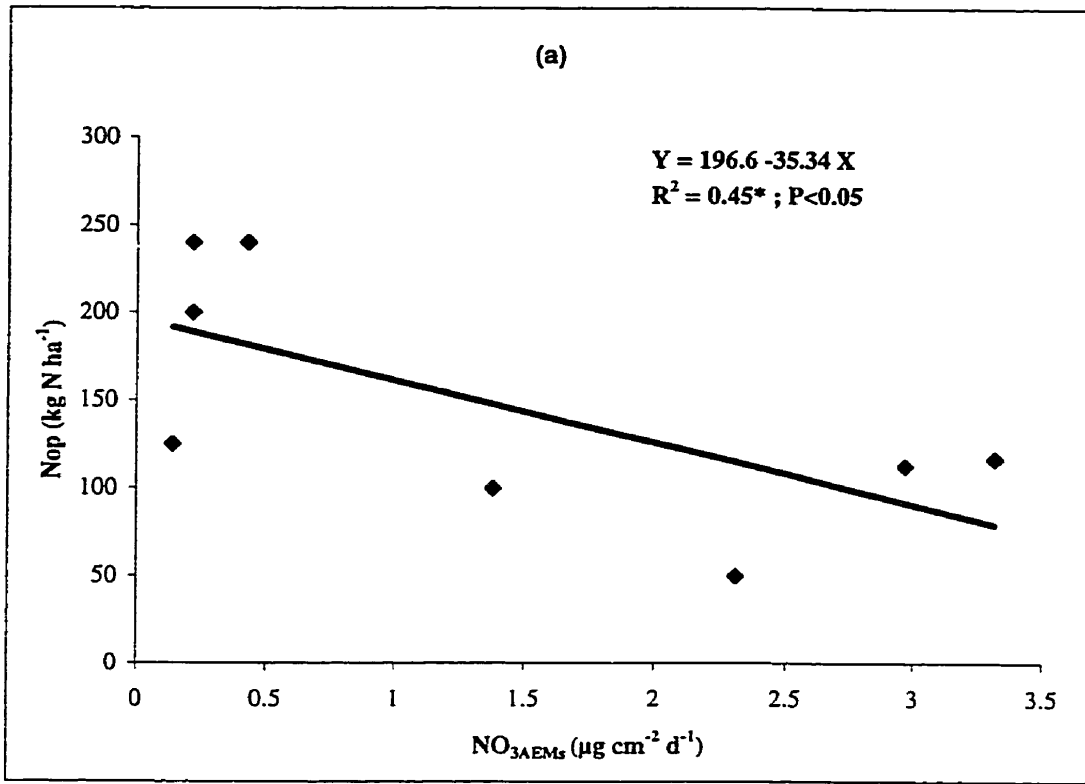


Figure 2

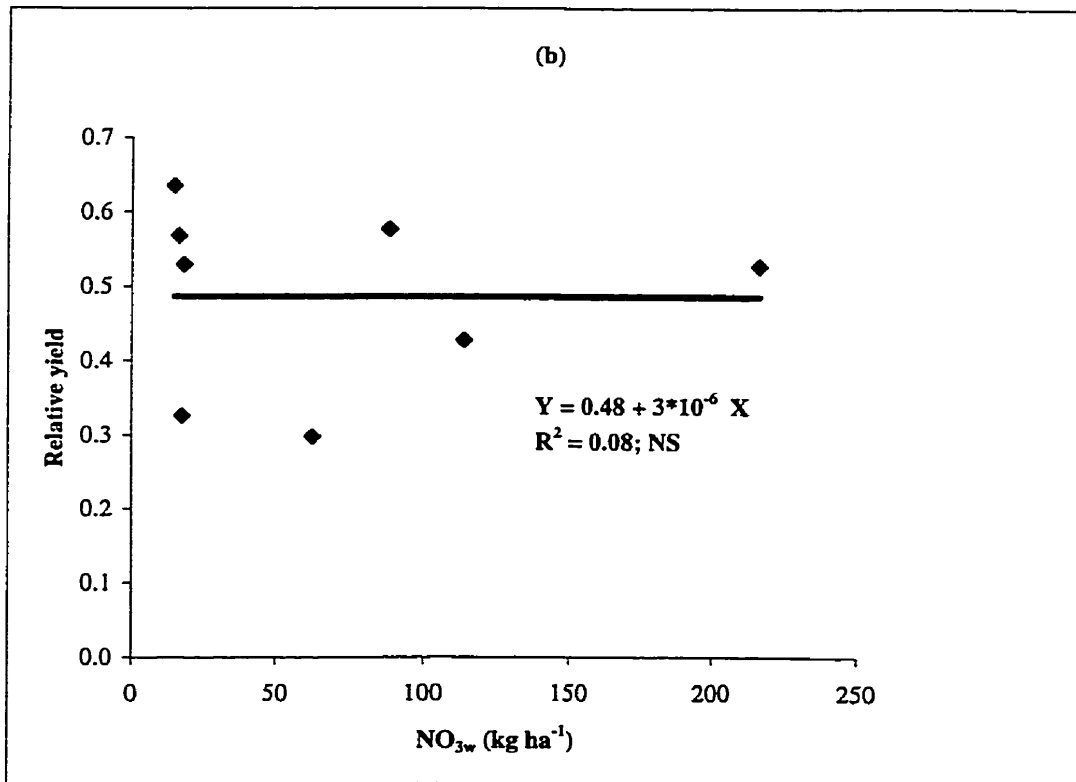
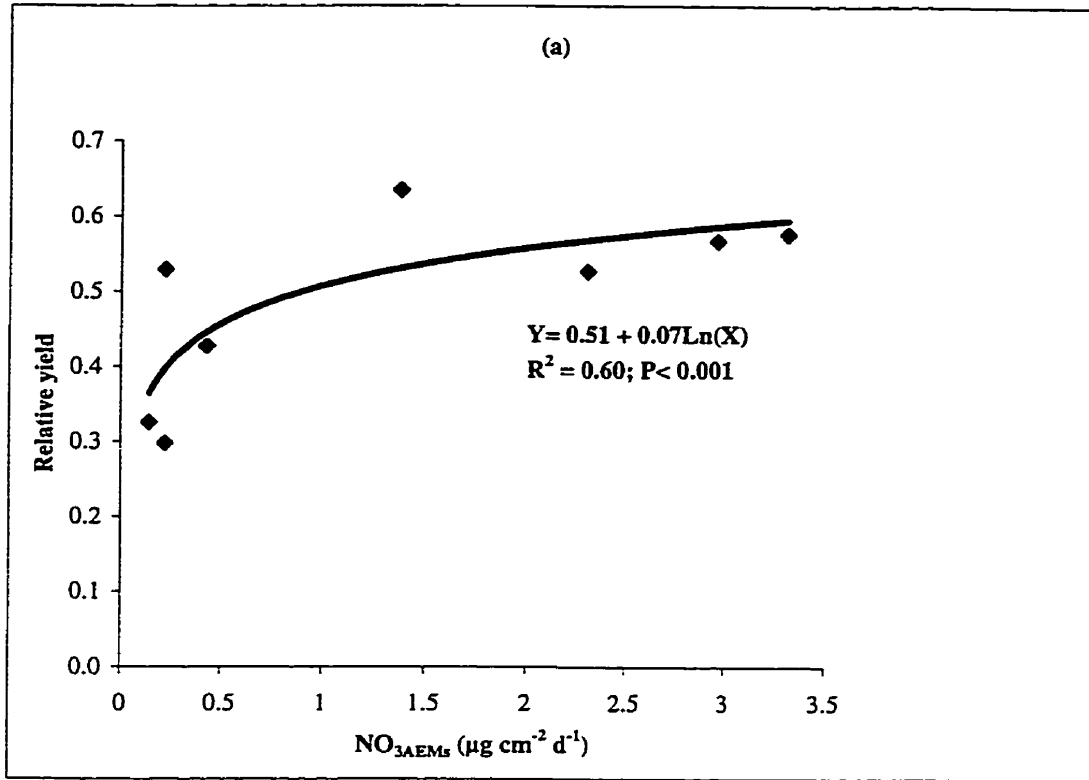


Figure 3



Le chapitre V est consacré à l'étude de l'effet de la fertilisation phosphatée sur la production des fourrages en Abitibi-Témiscamingue. Les résultats obtenus au champ ont démontré que les fourrages n'ont répondu à l'apport d'engrais phosphaté qu'à la troisième année de l'expérience (annexe 1). Ainsi, le rendement moyen durant les deux premières années de l'expérience, soient 1994 et 1995, a été de  $4,7 \text{ Mg ha}^{-1}$ . En 1996, le rendement moyen a varié de  $4,0 \text{ Mg ha}^{-1}$  (témoins) à  $4,8 \text{ Mg ha}^{-1}$  avec l'apport de la dose la plus élevée de P, soit  $120 \text{ kg de P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ . Cependant, les analyses de sol effectuées avant le début de l'expérience suite à l'échantillonnage de l'automne 1993 ont révélé que les sols à l'étude varient de pauvre à moyen en P selon les recommandations en vigueur au Québec (CPVQ 1994) utilisant le Mehlich 3 comme méthode de référence. La teneur moyenne de ces sols était de  $21 \text{ mg P kg}^{-1}$ . Une étude complémentaire en laboratoire s'est avérée nécessaire pour mieux caractériser les sols et essayer d'expliquer la faible et tardive réponse des fourrages à la fertilisation phosphatée. Quelques extractifs chimiques ainsi que la technique d'Électro-ultrafiltration ont été utilisés à cet effet en laboratoire.

## **CHAPITRE V**

**ÉVALUATION AU CHAMP DE LA DISPONIBILITÉ DU PHOSPHORE AUX  
FOURRAGES PAR ÉLECTRO-ULTRAFILTRATION ET PAR D'AUTRES  
MÉTHODES CHIMIQUES**

## RÉSUMÉ

La production de fourrages sur les sols de l'Abitibi-Témiscamingue n'est pas viable sans apport de P. Ainsi, la technique d'Électro-ultrafiltration (EUF) a été comparée à des méthodes chimiques pour caractériser la désorption du phosphore. Le phosphore a été désorbé à partir de quatre sols ayant reçu  $120 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$  durant trois saisons de croissance et à partir de quatre témoins. La quantité cumulative de P désorbé après 75 min des témoins par EUF à 200 V et  $20^\circ\text{C}$  a varié entre 10 et  $69 \text{ mg P kg}^{-1}$ . Les teneurs moyennes en P extrait du témoin ( $P_{0i}$ ) augmentent avec les procédures utilisées dans l'ordre suivant: EUF à 50 V et  $20^\circ\text{C}$  ( $P_{50}$ ,  $0,55 \text{ mg kg}^{-1}$ ); eau ( $P_w$ ,  $0,96 \text{ mg kg}^{-1}$ ); EUF à 200 V et  $20^\circ\text{C}$  ( $P_{200}$ ,  $4,90 \text{ mg kg}^{-1}$ ); EUF à 400 V et  $80^\circ\text{C}$  ( $P_{400}$ ,  $11,49 \text{ mg kg}^{-1}$ ); Olson ( $P_{ols}$ ,  $13,32 \text{ mg kg}^{-1}$ );  $\text{HCO}_3^-$  resin ( $P_{res}$ ,  $13,59 \text{ mg kg}^{-1}$ ) et Mehlich 3 ( $P_{M3}$ ,  $16,59 \text{ mg kg}^{-1}$ ). Des corrélations significatives ( $0,37 < r < 0,76$ ) ont été obtenues entre le P extrait par les méthodes chimiques et les différentes fractions de P désorbé par EUF. Une corrélation significative ( $0,39 < r < 0,84$ ) entre le prélèvement cumulatif du P par les fourrages et les quantités de P du sol désorbé a également été observée avec toutes les méthodes. Des degrés de linéarité élevés ( $0,97 < R^2 < 0,99$ ) entre le P désorbé à 200 V et  $20^\circ\text{C}$  par EUF et le temps ont été obtenus. Ces résultats indiquent que les sols étudiés ont une forte capacité de fournir le P à la solution du sol à partir du P en réserve. Ainsi, la technique d'EUF a démontré que la non-réponse initiale des fourrages à l'engrais phosphaté peut être attribuée aux réserves en P des sols étudiés. Par ailleurs, les méthodes chimiques utilisées, plus particulièrement la résine, ont démontré leur efficacité vis-à-vis de la disponibilité du P du sol aux fourrages de graminées produites dans la région de l'Abitibi-Témiscamingue.

**Mots-Clés :** P- Mehlich 3; P-Résine, P-Olsen, désorption du P, prélèvement du P.

**Auteurs:** Ziadi, N., T. S. Tran, R. R. Simard et G. Allard.

À soumettre au journal 'Plant and Soil'.

**Evaluation of soil-available phosphorus for grasses with the Electro-Ultrafiltration technique and some chemical extractions**

**ABSTRACT**

A positive response of grass to P fertilizer was observed only in the third year of the experiment on fine clay soils from Abitibi-Temiscamingue. Phosphorus was desorbed from four soils that had received  $120 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$  in three growing seasons (1994-1996) and from an unfertilized control. The cumulative amount of P desorbed after 75 min by EUF at 200 V and  $20^\circ\text{C}$  from the control varied from 10 to  $69 \text{ mg P kg}^{-1}$ . Increasingly higher average amounts of soil P were extracted from the control ( $P_{0i}$ ): EUF at 50V and  $20^\circ\text{C}$  ( $P_{50}$ ,  $0.55 \text{ mg kg}^{-1}$ ); water ( $P_w$ ,  $0.96 \text{ mg kg}^{-1}$ ); EUF at 200 V and  $20^\circ\text{C}$  ( $P_{200}$ ,  $4.90 \text{ mg kg}^{-1}$ ); EUF at 400V and  $80^\circ\text{C}$  ( $P_{400}$ ,  $11.49 \text{ mg kg}^{-1}$ ); Olsen ( $P_{ols.}$ ,  $13.32 \text{ mg kg}^{-1}$ ); and  $\text{HCO}_3^-$  resin ( $P_{res.}$ ,  $13.59 \text{ mg kg}^{-1}$ ); and Mehlich 3 ( $P_{M3}$ ,  $16.59 \text{ mg kg}^{-1}$ ). Significant correlations ( $0.37 < r < 0.76$ ) between P extracted by chemical methods and by the different EUF-P fractions were obtained. Significant correlations ( $0.39 < r < 0.84$ ) between cumulative grass P uptake and P desorbed were also obtained for all tested methods. A high degree of linearity ( $0.97 < R^2 < 0.99$ ) of the curves of EUF-P at 200 V and  $20^\circ\text{C}$  with time during 60 min was obtained. This indicates that soils have a high capacity to buffer soil solution P from reserve P. The EUF technique showed that the lack of grass response to P fertilizer was related to large soil P reserves. Close correlations between grass P uptake and resin-P indicated the adequacy of this method to determine plant available soil-P in the Abitibi-Temiscamingue region.

**Keywords:** P-Mehlich3, P-resin, P-Olson, P-desorption, Grass-P uptake.

## INTRODUCTION

Effective management of P fertilizer is not only critical to the economics of plant production but also to reduce the risk of eutrophication of surface waters (Sims et al. 1998). Many chemical methods have been used to estimate the plant-availability and the potential reserves of soil P. The degree of success of these methods in predicting the amount of fertilizer needed to reach optimum crops yields is often limited. This is mainly due to the fact that these soil test methods do not take into account the release of adsorbed P (Steffens 1994) and soil organic P mineralization (Tissen et al. 1994). Since growing plants continuously remove phosphate ions from the soil solution, the evaluation of the capacity of the soil P system to maintain P concentration in soil solution is important. Kuo (1997) stated "Soil P tests are operationally defined unless the related P buffering capacity of the soil is also included in the interpretation of the soil test results".

Current soil tests for plant-available P are mostly based on extracting solutions. The use of these methods showed significant correlation between the amount of P extracted from the soil, the plant growth, and the P uptake under controlled conditions (Tran and Giroux 1987; Simard et al. 1991; Tran et al. 1992a). The Electro-Ultrafiltration (EUF) technique, as an alternative to chemical extraction, has been successfully used, especially in Europe and Asia, to predict the short and long term availability of P from soils (Nemeth 1979) and from fertilizers (Judel et al. 1985; Steffens 1994).

The amount of P desorbed by EUF at 50 V and 20°C is a measure of P intensity. Nemeth (1985) found that the values of water soluble P were closely correlated with the contents of EUF-P at 20°C. Tran et al. (1992a) also reported a close relationship between the amount of P desorbed by EUF at 50V and 20°C and 0.01M CaCl<sub>2</sub>-extractable-P.

Simard and Tran (1993) indicated that EUF-extractable P and 0.5 M HCO<sub>3</sub>-soluble P are closely correlated to P uptake by oat (*Avena sativa* L.) and corn (*Zea mays* L.). Other studies reported that the amount of P desorbed in 30 min by EUF at 20°C from soils amended with fertilizers is better related to plant uptake and fertilizer responsiveness than

$\text{Ca}^{2+}$  or  $\text{NH}_4^+$ -lactate-extractable P (Nemeth and Makhdum 1981; Eifert et al. 1982). In addition, the calculation of the  $P_Q$  ratio (EUF-P-80°C/EUF-P-20°C) may improve the prediction of P fertilizer needs (Nemeth 1985).

In North America, the use of the EUF technique is still limited (Tran et al. 1992a; Simard and Tran 1993). These studies have been conducted under controlled conditions and no results were reported from *in situ* studies. This is also the case in Europe and Asia where the EUF technique is commonly used (Nemeth 1985; Steffens 1994).

Soils of Western Quebec area have been brought to cultivation in the 1940's and are not yet well studied (Simard et al. 1989). Grass grown under these conditions did not respond to P fertilizer during two growing seasons over a three years *in situ* study. Soils used in this study have initially low Mehlich 3 extractable P and have very high clay contents (Table 1). Some studies using chemical extraction reported that Mehlich 3 may underestimate the P-availability in clay soils (Simard et al. 1991; Cox 1994). A method that measure at the same time the intensity and the capacity of P soil may be better than standard methods both to assess plant-available P and the risk of surface water contamination (Simard and Tran 1993). The EUF technique is very well suited for that purpose. The EUF technique can also be used to study the rate of release of essential nutrients from soils. The knowledge of kinetics is fundamental to the understanding of the dynamic interaction between fertilizers and soils (Sparks 1989). The objectives of this study were: (i) to compare the effectiveness of the EUF technique to chemical extractions as predictors of available P for grass hay from four Abitibi-Temiscamingue soils, and (ii) to use the EUF technique to investigate the kinetics of P release from these soils.

## MATERIALS AND METHODS

### Field Experiments and Determination of Soil Properties

Field experiments were conducted from 1994 to 1996 at farm sites in the Abitibi-Temiscamingue area, province of Quebec, Canada. The soils of this area were developed on glacio-lacustrine fine deposits and have very high clay contents (Rompré and Carrier

1997). They have been cleared from the forest in the 1940's and have been very infrequently plowed since. Some physical and chemical properties of these soils are presented in Table 1. More details about field experiments were reported in Chapter III. During the three experimental years, P was applied as triple super phosphate at 0, 30, 60, 90, and 120 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>. The treatments were arranged in a randomized complete block design with four replicates. The plot size was 4 x 3 m. All fertilizers were broadcasted by hand; half of the amount was applied in early spring and the other half after the first harvest. Potassium were applied according to the Mehlich 3 soil test and N fertilizers were added according to provincial recommendations (Conseil des Productions Végétales du Québec 1994).

Grass hay was harvested twice a year from a 1.8 m<sup>2</sup> area. A 500 g sub-sample was taken for dry matter determination and dried at 55°C in a forced draft oven for three days. The sub-sample was ground to pass a 1 mm screen in a Wiley mill. The total P concentration in hay tissue was determined by colorimetry following a wet digestion in H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (Richards 1993). Seasonal forage DM yield was calculated by adding forage DM yields from the first and second harvest. Phosphorus uptake was calculated by multiplying forage DM by its P concentration. Seasonal P uptake was obtained by adding P uptake of the two harvests. All methods used to determine the soil properties are reported in chapter III.

#### **Characterization of the soil P status**

For laboratory studies, soil samples were taken from the 0-15 cm layer in May 1994 and August 1996. The treatments sampled are referenced as: P<sub>0i</sub> (control treatment in May 1994); P<sub>0f</sub> (control treatment in August 1996); P<sub>5f</sub> (120 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> treatment in August 1996).

The following chemical extraction methods were used to evaluate the soil available P from the treatments:

1. H<sub>2</sub>O, with a soil/solution ratio of 1:10 and continuous shaking for 30 min (Sissingh 1971) (P<sub>w</sub>);
2. 0.5 M NaHCO<sub>3</sub>, pH 8.5, with a soil/solution ratio of 1:20 and continuous shaking for 30 min (Olsen et al. 1954) (P<sub>ols</sub>);
3. Anionic Exchange Membrane (type AR, Ionics, Watertown, MA) with a soil/water ratio of 1:10 and continuous shaking for 16 h (Schoenau and Huang 1991) (P<sub>res</sub>);
4. Mehlich 3 with soil/solution ratio of 1:10 and equilibration time of 5 min (Tran and Simard 1993) (P<sub>M3</sub>).

### **Electro-Ultrafiltration Technique**

Phosphorus was also desorbed from treatments using the EUF technique (Nemeth 1979) with an automatic EUF apparatus (Model 683, Vogel Co., Giessen, Germany). Extracts from the anode and cathode of each fraction were combined in volumetric flasks and P concentrations were determined by colorimetry. Two experiments were carried out in triplicate using the EUF technique with a soil-water ratio of 4:60. In the first one, P was successively extracted from P<sub>oi</sub>, P<sub>of</sub> and P<sub>sf</sub> in three fractions: (i) 10 min at 50 V, 20°C and <15 mA (P<sub>50</sub>); (ii) 20 min at 200 V, 20°C and <15 mA (P<sub>200</sub>); (iii) 15 min at 400 V, 80°C and <150 mA (P<sub>400</sub>).

According to Nemeth (1985), an EUF ratio (P<sub>Q</sub>) is defined:

$$P_Q = P_{400} / (P_{50} + P_{200})$$

The total of P<sub>50</sub>, P<sub>200</sub> and P<sub>400</sub> is referred as P<sub>(EUF)</sub>.

In the second experiment, soils were characterized for their P reserve at the beginning of the experiment. Thus, P was successively extracted from the P<sub>oi</sub> treatment in 75 min in two fractions (i) twelve 5 min extractions at 200 V, 20°C and <15 mA (P<sub>0-60</sub>); (ii) three 5 min extractions at 400 V, 80°C and <150 mA (P<sub>60-75</sub>). Thus, 15 sub-samples were analysed as described above.



### **Statistical Analyses**

Analysis of variance (ANOVA) was carried out using the GLM procedure (SAS Institute, Inc. 1990) to study the effects of P fertilizer on forage DM yield, P uptake, and on the different P fractions as extracted by the selected methods. Two orthogonal contrasts were also used in order to compare the treatments ( $P_{0i}$  vs.  $P_{0f}$ ,  $P_{0i}$  vs.  $P_{5f}$ ). To characterize the soil P reserves, the cumulative P release from  $P_{0i}$  analyzed by EUF ( $P_{0-60}$  and  $P_{60-75}$ ) was plotted against time. The amounts of P desorbed by EUF were related to the different P fractions as extracted by chemical methods using simple correlation analysis. The cumulative grass P uptake and cumulative grass yield were related to the amounts of P extracted by simple correlation. All experimental error variances were tested for homogeneity using Bartlett's test (Steel and Torrie 1980).

## **RESULTS AND DISCUSSION**

### **Soil Characteristics**

Selected soil characteristics are presented in Table 1. Studied soils were slightly acidic (Ste-Gertrude) to slightly alkaline (Laverlochere). Statistical analysis showed that studied soils have high organic matter contents, particularly at Laverlochere, and the soils from Abitibi (Ste-Gertrude and Palmarolle) have higher clay contents than those from Temiscamingue (Laverlochere and Lorrainville). All soils can be classified as low in Mehlich 3 extractable P contents (Conseil de Production Végétale du Québec 1994). They also have high extractable Ca and Mg contents (Table 1). According to standards used in the province (Conseil de Production Végétale du Québec 1994) based on the amounts of Mehlich 3 extractable Al, studied soils have low (Palmarolle, Laverlochère and Lorrainville) to medium (Ste-Gertrude) capacity to fix P (Table 1).

### Soils Phosphorus Status

The soil P contents extracted by the different procedures are given in Table 2. The following procedures extracted increasingly higher average amounts of soil P from the initial soil (studied soils prior to the beginning of the experiment) ( $P_{0i}$ ): EUF at 20°C and 50 V ( $P_{50}$ , 0.55 mg kg<sup>-1</sup>); water ( $P_w$ , 0.96 mg kg<sup>-1</sup>); EUF at 20°C and 200 V ( $P_{200}$ , 4.90 mg kg<sup>-1</sup>); EUF at 80°C and 400 V ( $P_{400}$ , 11.49 mg kg<sup>-1</sup>); Olsen ( $P_{ols}$ , 13.32 mg kg<sup>-1</sup>); HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> resin ( $P_{res}$ , 13.59 mg kg<sup>-1</sup>); and Mehlich 3 ( $P_{M3}$ , 16.59 mg kg<sup>-1</sup>).

The amount of P desorbed at 20°C ( $P_{(50+200)}$ ) was higher than the amount of water-soluble P in all sites. On average,  $P_{(50+200)}$  was 6.93 mg P kg<sup>-1</sup> whereas water-soluble P was 1.30 mg P kg<sup>-1</sup>. The higher values obtained by EUF than with water were not surprising since EUF-P at 20°C recovers the phosphate ions in the soil solution and a fraction of the desorbable phosphate in weakly acidic to neutral soils (Nemeth 1985). The pH of our soils varied between 5.9 and 7.2. Results obtained in this study confirm those of previous studies conducted on Quebec soils (Tran et al. 1992; Simard and Tran. 1993). The amount of P desorbed by EUF at 400 V and 80°C from the soils was generally lower than the amount of P desorbed by the HCO<sub>3</sub>-resin and by 0.5 M NaHCO<sub>3</sub> except at Laverlochere site. This result can be explained by the higher pH of the soil at this site as compared to the other sites. It was reported that higher amounts of P were desorbed by EUF at 400 V and 80°C from calcareous soils than from soils with pH below 7.0 (Nemeth 1985).

The amount of P extracted by Mehlich 3 was on average 16.3 mg kg<sup>-1</sup> and was comparable to that extracted by resin (15.5 mg kg<sup>-1</sup>), Olsen (16 mg kg<sup>-1</sup>) and EUF (18.93 mg kg<sup>-1</sup>). Furthermore, a close correlation was obtained between all used chemical extractions, especially, between P extracted with resin and the Olsen solution (Table 4). These results agree with those of Tran et al. (1992) reporting significant correlation between some chemical methods and resin for estimating P availability. According to standards used in the area based on the amounts of Mehlich 3 extractable P, Lorrainville site can be classified as medium P availability for forages, whereas, the other three sites

can be classified as low.

The analysis of variance showed a significant effect of P fertilizer additions on cumulative forage dry matter yield and P uptake, and on the amount of soil P extracted by the selected methods except for P desorbed by EUF at 400 V and 80°C (Table 3). On average, when 120 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup> were applied, increasingly higher average amounts of soil P were extracted by EUF at 50 V and 20°C (1.40 mg kg<sup>-1</sup>); water (P<sub>w</sub>, 1.63 mg kg<sup>-1</sup>); EUF at 200 V and 20°C (P<sub>200</sub>, 7.25 mg kg<sup>-1</sup>); EUF at 80°C and 400 V (P<sub>400</sub>, 14.68 mg kg<sup>-1</sup>); HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> resin (P<sub>res</sub>, 20.87 mg kg<sup>-1</sup>); Mehlich 3 (P<sub>M3</sub>, 22.30 mg kg<sup>-1</sup>) and Olsen (P<sub>ols</sub>, 23.22 mg kg<sup>-1</sup>). Thus, P fertilizer resulted in an increase of each fraction of soil P extracted by the selected methods (Table 2). The contrast P<sub>oi</sub> vs P<sub>5r</sub> was significant for all selected methods of extraction except for EUF-P<sub>400</sub> and EUF-P<sub>50</sub> (Table 3). A small decrease of soil P content in the control treatments (P<sub>oi</sub> vs P<sub>0r</sub>) was, however, observed after the three year study especially for P<sub>M3</sub> (Table 2).

The P<sub>Q</sub> ratio, reflecting the characteristics of soil P supply, varied between 0.73 and 3.54 (Table 2). These values are higher than those reported by Simard and Tran (1993) and by Nemeth (1985). Simard and Tran (1993) explained this difference by the ubiquity of Ca phosphates in the Quebec soils as reported by previous studies (Giroux and Tran 1985; Tran and Giroux 1987).

### Phosphorus Desorption

In each time interval, the amounts of P desorbed by EUF at 200 V and 20°C from the control were added and plotted against the extraction time (Fig. 1). After 75 minutes, the cumulative P desorbed by EUF varied between 10 mg P kg<sup>-1</sup> for Ste-Gertrude soil and 69 mg P kg<sup>-1</sup> for Lorrainville soil. Between 37 and 58% of cumulative P was desorbed after 60 min at 200 V and 20°C. The remaining P was desorbed in 15 min as temperature and voltage were simultaneously raised to 400 V and 80°C respectively. At each site, the largest amount of soil P was desorbed in a single cycle P in the first 5 min at 400 V and 80°C indicating that these soils have an important amount of P in slowly available forms

compared with more labile forms (Simard and Tran 1993).

The cumulative amount of P desorbed by EUF at 200 V and 20°C (EUF<sub>0-60</sub>) linearly increased with contact time for all sites (Fig. 2;  $0.97 < r^2 < 0.99$ ). This indicates that soils have a high capacity to buffer solution P from reserve-P forms and this may explain the lack of grass response to P fertilizer during the field experiment.

### **Relationships Between P Desorbed by EUF and by Other Procedures**

The amounts of P desorbed by EUF were significantly related to that extracted by most chemical methods (Table 4). The lowest coefficient of correlation (0.37) was obtained between the amount of P extracted by water and P desorbed by EUF at 50 V and 20°C. Water-extractable P was weakly related to the different P fractions extracted by EUF at 20°C ( $0.37 < r < 0.52$ ). However, the amounts of P extracted by water were lower than that extracted by EUF at 20°C (P<sub>(50+200)</sub>). These results agree with those of Nemeth (1985) and Simard and Tran (1993). Phosphorus extracted by Mehlich 3, the standard method used in the province of Quebec, was significantly related to each fraction desorbed by EUF ( $0.52 < r < 0.76$ ). This result confirm other researches reported in the literature (Tran et al. 1992b).

The P<sub>400</sub> was significantly related to P extracted with water ( $r = 0.52^{***}$ ); HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> exchange resin ( $r = 0.61^{***}$ ); 0.5M NaHCO<sub>3</sub> ( $r = 0.61^{***}$ ) and Mehlich3 ( $r = 0.77^{***}$ ). Nemeth (1982) and Tran et al. (1992a) reported that in neutral and calcareous soils in which apatite and/or tricalcium phosphate are present, the capacity of EUF to continuously remove Ca<sup>2+</sup> ions from the extraction solution greatly increases the amount of P desorbed. Thus, a significant correlation ( $r = 0.72^{***}$ ) between P<sub>400</sub> and rapidly exchangeable Ca<sup>2+</sup> was obtained in the present study (data not shown).

### **Relationship between Different Phosphorus-Availability Indices and Phosphorus Uptake by Forage**

The forage cumulative P uptake at each site was higher in the fertilized than in the control treatments ( $P_{0i}$ , Table 2). The mean cumulative P uptake by grass was about 39 kg P ha<sup>-1</sup> for the control and 51 kg P ha<sup>-1</sup> when 120 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> was applied. It ranged from 27 kg P ha<sup>-1</sup> at Ste-Gertrude to 58 kg P ha<sup>-1</sup> for P<sub>sf</sub> at Palmarolle (Table 2). The Ste-Gertrude site showed the lowest P uptake of all sites. This may be explained by a lower soil P content compared to the other sites as indicated by the amount of P extracted with the different tested methods.

A significant correlation between grass cumulative P uptake and the different studied methods was observed ( $0.39 < r < 0.84$ ; Table 4). Furthermore, Simard and Tran (1993) found that EUF-extractable P and 0.5 M HCO<sub>3</sub>-soluble P were closely correlated to P uptake by oat (*Avena sativa* L.) and by corn (*Zea mays* L.). In addition, Nemeth (1985) suggested that the amounts of P that are easily available to a crop during a vegetation period can be well characterized by extraction with EUF at 200 V and 20°C in 30 min. Our study shows a significant correlation between cumulative P uptake and P extracted at 20°C ( $P_{(50+200)}$ ,  $r = 0.39^{**}$ ). The P<sub>M3</sub>, P<sub>w</sub>, and P<sub>res.</sub> were better correlated with cumulative P uptake than the other tested methods. The best correlation between grass cumulative P uptake and all tested methods was obtained when resins were used. In a study conducted in the comparison of four resin extractions, Tran et al. (1992a) concluded that resin provide a more precise evaluation of P availability than chemical extractions. The water-soluble P (P<sub>w</sub>) and Mehlich 3 methods were better than EUF in predicting P grass uptake. It was previously observed that EUF was not an adequate method for soils containing sparingly soluble Ca-phosphates (Tran et al. 1992b). The studied soils are rich in Ca. Our in situ results confirm experiments conducted under controlled conditions that indicated EUF as an inadequate method to predict plant P availability in Ca-rich soils.

Consequently, we concluded that the desorption of soil P by EUF is less adequate than chemical methods to assess the P-supplying power of Abitibi-Temiscamingue soils. This finding are in line with previous work conducted in controlled conditions by Tran et al.

(1992b).

### CONCLUSION

The obtained high degree of linearity ( $0.97 < R^2 < 0.99$ ) of the curves of EUF-P at 200 V and 20°C with time during 60 min indicates that the soils have high capacities to buffer soil solution P with P from their reserves. These results may explained the lack of grass response to P fertilizer during the first two years in the field experiments. The high significant correlation obtained between chemical methods and cumulative P uptake by grass indicate the adequacy of these methods of assessing soil-P availability. The anion exchange resins are particularly suitable to desorb the fraction of soil P that is available to plants since it showed the best correlation with the grass cumulative P uptake ( $r = 0.84^{***}$ ). A close correlation was also observed between Mehlich 3 and cumulative P uptake ( $r = 0.58^{***}$ ). The plants showed limited response to P fertilizers even though they should have been rated as poor or medium according to the current fertilizer recommendation from Quebec (CPVQ 1996) or Ontario (OSMRC 1997). This suggests that modified P fertilizer recommendation tables for the fined-textured clay soils from Ontario and Quebec should be produced.

## REFERENCES

- Conseil des Productions Végétales du Québec. 1994.** Grilles de Références en Fertilisation. Agdex 540. Gouvernement du Québec, Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation. 128pp.
- Cox, F. R. 1994.** Predicting increases in extractable phosphorus from fertilizing soils of varying clay content. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **58**: 1249-1253.
- Eifert, J., Varnai, M. and Szöke, J. 1982.** Applications of the EUF-procedure in grape production. *Plant Soil.* **64**: 105-113.
- Giroux, M., and Tran, T. S. 1985.** Évaluation du phosphore assimilable des sols acides avec diverses méthodes d'extraction en relation avec les rendements de l'avoine et les propriétés du sol. *Can. J. Soil Sci.* **65**: 47-60.
- Judel, G. K., Gebauer, W. G., and Mengel, K. 1985.** Yield response and availability of various phosphate fertilizer types as estimated by EUF. *Plant Soil* **83**: 107-115.
- Kuo, S. 1997.** Phosphorus. Pages: 869-919 *in* Methods of Soil Analysis. Part. 3. Chemical Methods-SSSA. Book Series no. 5. Madison, WI.
- Nemeth, K. 1979.** The availability of nutrients in the soil as determined by electro ultrafiltration (EUF). *Adv. Agron.* **31**: 155-187.
- Nemeth, K. 1982.** Electro-Ultrafiltration of aqueous soil suspensions with simultaneous varying temperature and voltage. *Plant Soil.* **64**: 7-23.
- Nemeth, K. 1985.** Recent advances in EUF research (1980-1983). *Plant Soil* **83**: 1-19.
- Nemeth, K., and Makhdum, J. J. 1981.** The evaluation of nutrient dynamics in calcareous soils from Pakistan by means of electro-ultrafiltration (EUF). *Soil Sc. Plant Nutr.* **27** : 159-168.
- Olsen, S. R. Cole, C. V. , Watanabe, F. S. , and Dean, L. A. 1954.** Estimation of available phosphorus by extraction with sodium bicarbonate. *USDA Cir. 939.* U. S. Gov. Print. Office, Washington, DC.
- Richards, J. E. 1993.** Chemical characterization of plant tissue. Pages 115-139. *in* M. R. Carter, ed. Soil sampling and methods of analysis. Canadian Society of Soil Science. Lewis Publishers, Boca Raton, FL.
- Rompré, M. and Carrier, D. 1997.** Étude pédologique des sols défrichés de l'Abitibi-Témiscamingue. MAPAQ (ISBN 2-550-30732-1). Bibliothèque nationale du Québec. Québec.

- Schoenau, J. J. and Huang, W. Z. 1991.** Anion exchange membrane, water, and sodium bicarbonate extractions as soil tests for phosphorus. *Commun. Soil Sci. Plant Anal*: 465-492.
- Sissingh, H. A. 1971.** Analytical technique of the Pw method, used for the assessment of the phosphate status of arable soils in the Netherlands. *Plant Soil* **34**: 483-486.
- Simard, R. R. and Tran, T. S. 1993.** Evaluating plant-available phosphorus with the electro-ultrafiltration technique. *Soil Sci. Soc. Am.J.* **57**: 404-409.
- Simard, R. R., DeKimpe, C. R. and Zizka, J. 1989.** The kinetics of non exchangeable potassium and magnesium release from Quebec soils. *Can. J. Soil Sci.* **69**: 663-675.
- Simard, R.R. , Tran, T. S., and Zizka, J. 1991.** Strontium chloride-citric acid extraction evaluated as a soil testing procedure for phosphorus. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **55**: 414-421.
- Sims, J. T. Simard, R. R., and Joern, B. C. 1998.** Phosphorus loss in agricultural drainage: Historical perspective and current research. *J. Environ. Qual.* **27**: 277-293.
- Statistical Analysis System Institute Inc. 1996.** *Statistics*. 6th ed., SAS Institute Inc., Cary, NC.
- Sparks, D. L. 1989.** *Kinetics of soil chemical processes*. Academic Press, London, UK, 240pp.
- Steel, R. G. D. and Torrie, J. H. 1980.** *Principles and procedures of statistics: A biometrical approach*. McGraw-Hill Publishing Co. NY.
- Steffens, D. 1994.** Phosphorus release kinetics and extractable phosphorus after long-term fertilization. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **58**: 1702-1708.
- Tiessen, H., Stewart, J. W. B., and Olsen, A. 1994.** Innovation soil phosphorus availability indices: Assessing organic phosphorus. Pages 143-162 in *in* J. L. Havlin, ed. *Soil Testing: Prospects for improving nutrient recommendations*. SSSA Spec. Publ. 40. ASA and SSSA, Madison, WI.
- Tran, T. S., and Giroux, M. 1987.** Disponibilité du phosphore dans les sols neutres et calcaires du Québec en relation avec leurs caractéristiques chimiques et physiques. *Can. J. Soi Sci.* **67**: 1-16.
- Tran, T. Sen and 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, FL.



**Tran, T. S., Simard, R. R., and Tabi, M. 1992a.** Evaluation of the electro-ultrafiltration technique (EUF) to determine available P in neutral and calcareous soils. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* **23**: 2261-2281.

**Tran, T. S. , Simard, R. R. and Fardeau, J. C. 1992b.** A comparison of four resin extractions and  $^{32}\text{P}$  isotopic exchange for the assessment of plant-available P. *Can. J. Soil Sci.* **72**: 281-294.

## LIST OF FIGURES

**Fig. 1 .** Incremental amount of P extracted by Electro-ultrafiltration (EUF) from the control (soils sampled in May 1994). Extraction at 200 V and 20 °C during 60 min (EUF<sub>0-60</sub> fraction) ; extraction at 400 V and 80 °C during 15 min (EUF<sub>60-75</sub>).

**Fig. 2.** Cumulative amount of P extracted by Electro-ultrafiltration (EUF) from the control (soils sampled in May 1994) vs. time. Extraction at 200 V and 20°C during 60 min (EUF<sub>0-60</sub> fraction).

Table 1. Chemical and physical properties of studied soils

Sites	Ste-Gertrude	Palmarolle	Laverlochere	Lorrainville
pH	5.9c	6.0bc	7.2a	6.3b
O.M. <sup>z</sup> (g kg <sup>-1</sup> )	45.0bc	62.0b	118.0a	52.0bc
CEC <sup>y</sup> (cmol(+) kg <sup>-1</sup> )	36.82b	41.14a	35.0a	24.4c
<b>Particle size distribution (g kg<sup>-1</sup>)</b>				
Clay	860a	850a	700b	700b
Sand	18b	26a	15b	28a
Silt	122b	124b	285a	272a
<b>Mehlich 3 (mg kg<sup>-1</sup>)</b>				
P	11b	25a	28a	19b
K	180b	190b	232a	135c
Ca	2604b	2859b	5609a	2250c
Mg	518a	535a	520a	367b
Al	1261a	976b	823c	1070b
P/Al	0.01	0.03	0.03	0.02
Latitude	48° 34' N	48° 47' N	47° 21' N	47° 21' N
Longitude	78° 8' W	79° 13' W	79° 26' W	79° 26' W

<sup>z</sup>O.M. =Organic matter

<sup>y</sup>CEC = Cation exchange capacity

Within a same line, means followed by the same letter are not statistically different at P = 0.05 according to the least significant difference test.

Table 2: Amounts of P extracted by selected procedures, P<sub>Q</sub> ratio, cumulative grass yield and cumulative P uptake

Sites	Treatments	P <sub>50</sub>	P <sub>200</sub>	P <sub>400</sub>	P <sub>(50+200)</sub> (mg kg <sup>-1</sup> )	P <sub>Q*</sub>	P <sub>M3</sub>	P <sub>EUf</sub>	P <sub>w</sub>	P <sub>ols</sub>	P <sub>res</sub>	Cumualative yield (Mg ha <sup>-1</sup> )	Cumulative P uptake (kg ha <sup>-1</sup> )
<b>Ste-Gertrude</b>	P <sub>0l</sub>	0.17	0.79	1.75	0.97	1.86	9.67	2.71	0.53	9.89	12.36	-	-
	P <sub>0r</sub>	1.32	2.68	2.59	4.00	0.73	2.42	6.59	0.56	6.80	9.16	9.72	27.34
	P <sub>5r</sub>	0.35	1.40	2.63	1.75	1.98	10.35	4.38	1.12	16.49	14.24	11.15	36.83
<b>Palmarolle</b>	P <sub>0l</sub>	0.35	1.56	5.19	1.91	2.85	9.82	7.10	0.82	11.46	10.93	-	-
	P <sub>0r</sub>	1.18	3.25	5.19	4.42	1.17	7.91	9.61	1.47	10.95	9.76	14.67	40.70
	P <sub>5r</sub>	0.96	3.25	4.36	4.21	1.10	14.06	8.57	1.29	22.62	18.23	16.48	58.54
<b>Laverlochere</b>	P <sub>0l</sub>	0.62	13.43	23.01	14.05	1.64	18.16	37.07	1.33	17.64	14.99	-	-
	P <sub>0r</sub>	1.18	9.82	20.63	11.00	1.89	16.44	31.63	1.55	18.88	16.61	14.58	42.61
	P <sub>5r</sub>	2.66	16.68	36.40	19.34	1.96	35.90	55.74	2.26	33.94	30.01	15.54	50.66
<b>Lorraineville</b>	P <sub>0l</sub>	1.07	3.80	16.01	4.87	3.54	28.72	20.88	1.18	14.29	16.06	-	-
	P <sub>0r</sub>	1.29	5.98	10.96	7.28	1.51	13.55	18.23	1.60	9.29	12.52	13.77	44.11
	P <sub>5r</sub>	1.61	7.68	15.32	9.29	1.66	28.88	24.61	1.87	19.82	20.98	15.27	56.95
<b>mean (all soils)</b>	P <sub>0l</sub>	0.55	4.90	11.49	5.45	2.47	16.59	16.94	0.96	13.32	13.59	-	-
	P <sub>0r</sub>	1.24	5.43	9.84	6.68	1.33	10.08	16.52	1.29	11.48	12.01	13.18	38.69
	P <sub>5r</sub>	1.40	7.25	14.68	8.65	1.67	22.30	23.33	1.63	23.22	20.87	14.61	50.74
<b>mean (all soils and treatments)</b>		1.07	5.86	12.00	6.93	1.82	16.32	18.93	1.30	16.01	15.49	13.66	44.72

\* P<sub>Q</sub> = P<sub>400</sub>/P<sub>(50+200)</sub>

Table 3: Effects of P application (Mean square values) on P extracted by selected procedures,  $P_Q$ , cumulative grass yield, and cumulative P uptake

Source of Variation	d.f.	$P_{50}$	$P_{200}$	$P_{400}$	$P_{(50+200)}$	$P_{EUF}$	$P_Q^*$	$P_{M3}$	$P_w$	$P_{ols.}$	$P_{res.}$	Cumulative Yield	Cumulative $P_{uptake}$
Treatment (T)	2	4.04***	26.49**	25.47	50.14***	109.38*	6.81**	481.48***	5.99**	478.46***	267.45***	8.16**	581.21***
Replicates	2	0.41	4.08	47.00	3.63	60.66	0.82	182.35	0.02	80.38	87.52**	13.78***	116.66*
Site (S)	3	1.21*	217.07***	829.70***	245.54***	1966.65***	1.13	723.91***	1.69	251.37***	136.80**	49.56***	609.99***
T*S	6	0.90*	10.18*	12.5	15.56*	44.63	1.71	64.69	0.15	18.67	24.48	0.12	18.91
Contrasts													
$P_{01}$ vs. $P_{0r}$	1	3.44*	7.57	16.35	21.22*	0.32	12.23**	234.94**	0.65	20.28	14.79	-	-
$P_{01}$ vs. $P_{5f}$	1	0.88	19.89*	50.63	29.13*	156.62*	0.52	962.92***	6.31**	826.91***	469.76***	12.24**	871.82***

\*  $P_Q = P_{400}/P_{(50+200)}$

Table 4: Simple correlation coefficient (r) between P extracted by selected procedures, cumulative grass yield and cumulative P uptake

	P <sub>50</sub>	P <sub>200</sub>	P <sub>400</sub>	P <sub>(50+200)</sub>	P <sub>euf</sub>	P <sub>M3</sub>	P <sub>Q</sub>	P <sub>w</sub>	P <sub>ols</sub>	P <sub>resine</sub>	Cumulative Yield	Cumulative P uptake
P <sub>50</sub>												
P <sub>200</sub>	0.57***											
P <sub>400</sub>		0.34*										
P <sub>(50+200)</sub>			0.82***									
P <sub>euf</sub>				0.67***								
P <sub>M3</sub>					0.48**							
P <sub>Q</sub>						0.52**						
P <sub>w</sub>							0.19					
P <sub>ols</sub>								0.24				
P <sub>resine</sub>									0.37*			
										0.69***		
											0.26	
												0.40**
												0.39**
												0.40*
												0.44**
												0.41**
												0.58***
												0.09
												0.60***
												0.54***
												0.84***

Figure 1

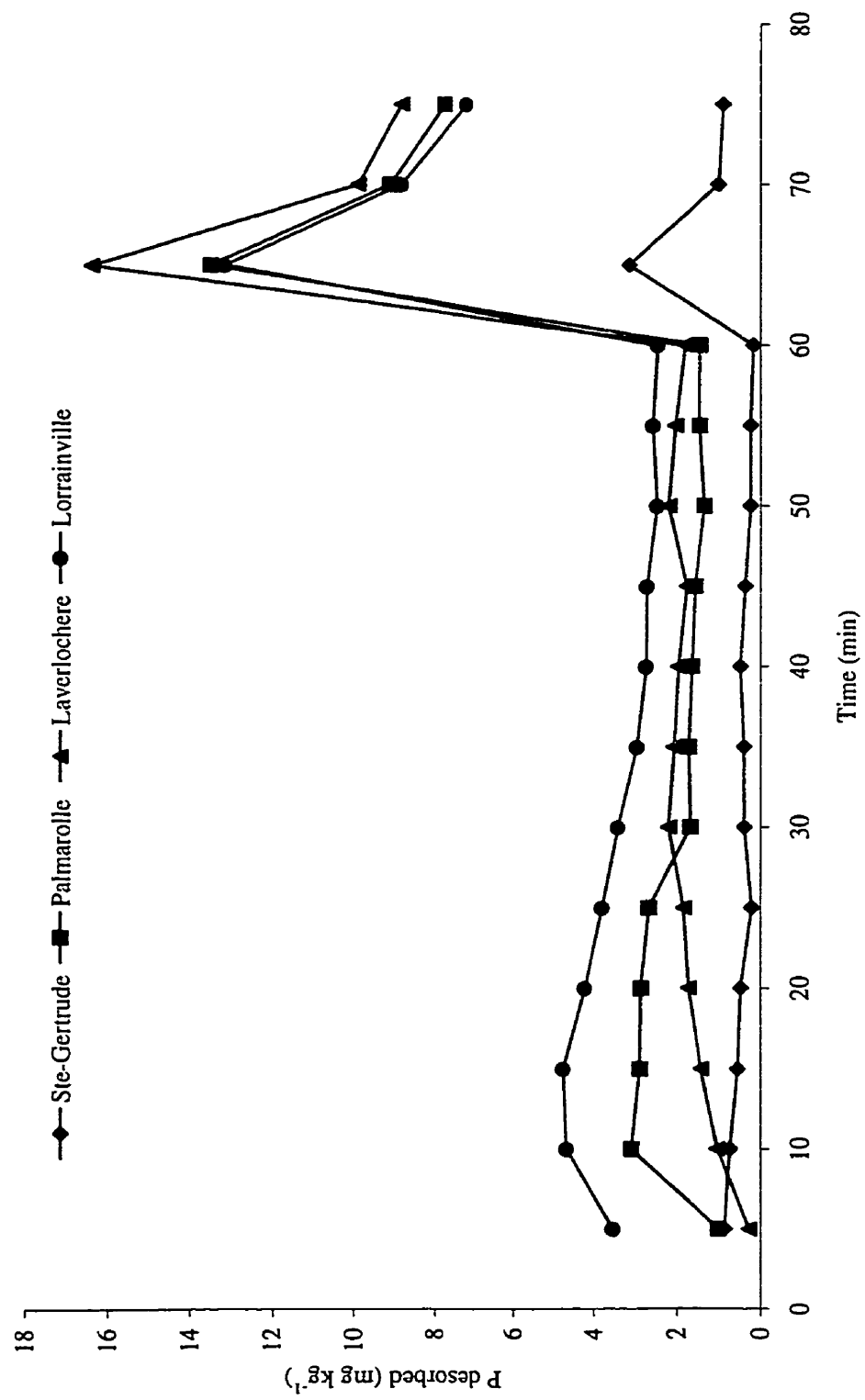
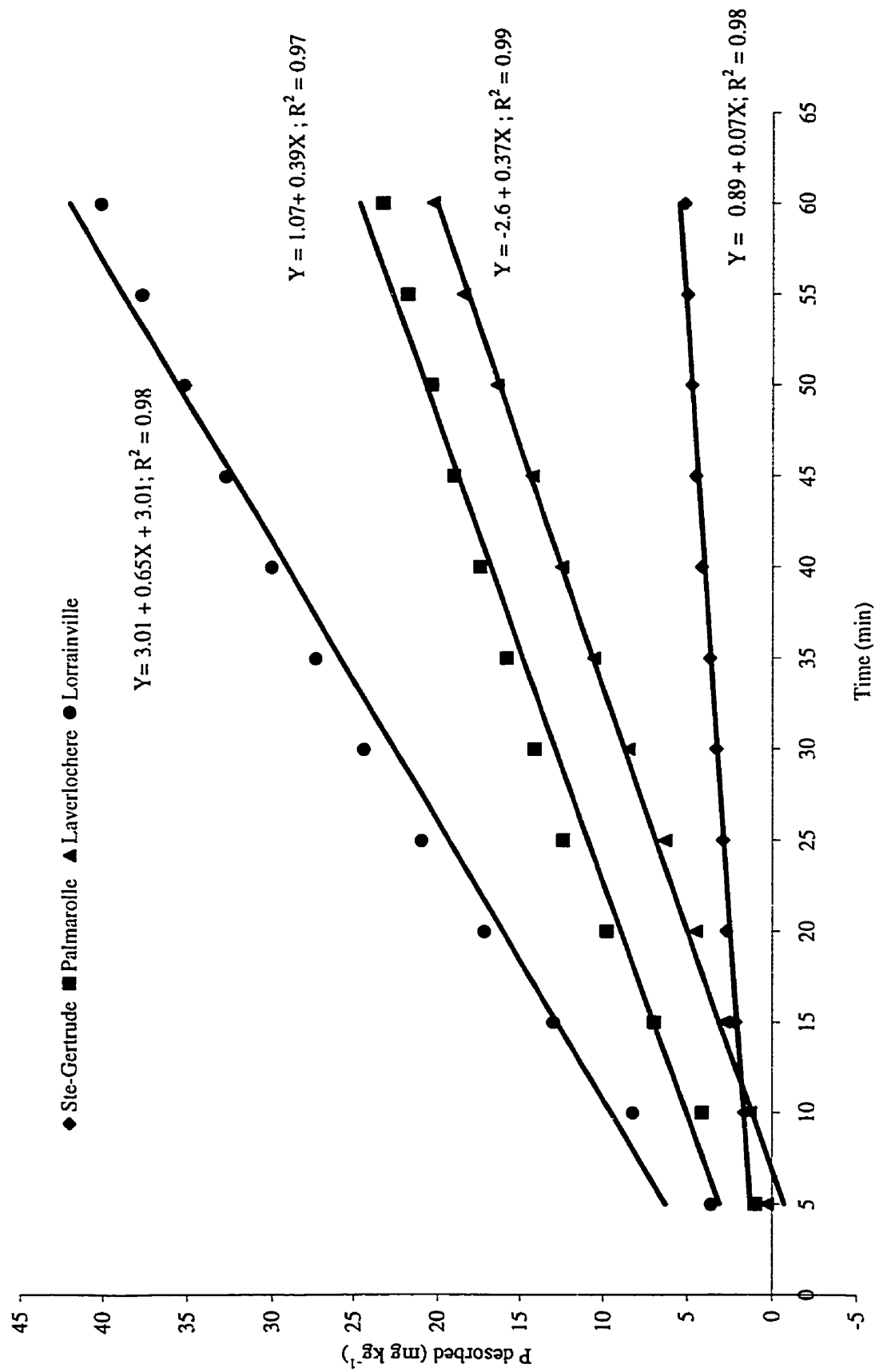


Figure 2





Les chapitres VI et VII sont consacrés à l'étude de l'effet de la fertilisation potassique dans la production de fourrages en Abitibi-Temiscamingue. Les résultats obtenus au champ ont démontré que les fourrages n'ont pas répondu à la fertilisation potassique (annexe 2). Ainsi, le rendement moyen durant les trois années était de  $4,5 \text{ Mg ha}^{-1}$ . Afin d'identifier les causes de cet absence de réponse, une étude complémentaire a été conduite en laboratoire afin d'identifier l'origine du K disponible aux plantes. La technique d'Électro-ultrafiltration (EUF) a été comparée au  $1\text{M NH}_4\text{OAc}$ , au Mehlich3, et au  $1\text{M HNO}_3$  pour caractériser la désorption du K des sols étudiés.

## **CHAPITRE VI**

**ÉVALUATION DE LA CAPACITÉ D'APPROVISIONNEMENT EN POTASSIUM  
DES SOLS DE L'ABITIBI-TÉMISCAMINGUE PAR ELECTRO-  
ULTRAFILTRATION ET PAR QUELQUES MÉTHODES CHIMIQUES**

## RÉSUMÉ

Les fourrages n'ont pas répondu à la fertilisation potassique pendant trois années d'exploitation. L'origine du K disponible aux plantes doit être identifiée afin de déterminer les modifications possibles à effectuer aux recommandations en fertilisation potassique en vigueur. La technique de l'Electro-Ultrafiltration (EUF) a été comparée au 1M NH<sub>4</sub>OAc, Mehlich3, 1M HNO<sub>3</sub> pour caractériser la désorption du K. Deux séries d'expériences ont été conduites en laboratoire sur quatre sols recevant ou non du K (0 et 200 kg K<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>). En moyenne, les quantités de K extraites du sol augmentent avec les procédures utilisées dans l'ordre suivant: EUF à 50 V et 20°C (21 mg kg<sup>-1</sup>), EUF à 200 V et 20°C (59 mg kg<sup>-1</sup>), EUF à 400 V et 80°C (68 mg kg<sup>-1</sup>), Mehlich 3 (202 mg kg<sup>-1</sup>), 1 M NH<sub>4</sub>OAc (214 mg kg<sup>-1</sup>) et 1 M HNO<sub>3</sub> (1808 mg kg<sup>-1</sup>). Des corrélations significatives entre le prélèvement cumulé de K par les fourrages et le K du sol ont été obtenues seulement lorsque la technique d'EUF a été utilisée. Des degrés de linéarité assez élevés ( $0,94 < R^2 < 0,98$ ) entre le K désorbé avec EUF à 200 V et 20°C et le temps de désorption ont été obtenus. Les résultats indiquent que les sols étudiés ont une forte capacité de fournir du K à la solution du sol à partir des formes rapidement et lentement échangeables. La technique d'EUF a démontré que le manque de réponse des fourrages à l'engrais potassique est attribué à leurs réserves en K. L'extraction du K avec EUF peut être alors utilisée pour estimer la capacité des sols de l'Abitibi-Témiscamingue à libérer le K avec plus de précision que les extractions chimiques rapides.

**Mots clé :** K-HNO<sub>3</sub>, K-Mehlich 3, K-HNO<sub>3</sub>.

**Auteurs:** Ziadi, N., R. R. Simard, T. S. Tran et G. Allard.

À soumettre au journal 'Plant and Soil'.

**Evaluation of the potassium supplying power of Abitibi-Temiscamingue soils by electro-ultrafiltration and chemical methods**

**ABSTRACT**

A three-year-study showed no response of forages to K fertilizer on soils from Abitibi-Temiscamingue. The origin of the plant-available K has thus to be identified to refine fertilizer K recommendations. The electro-ultrafiltration technique (EUF) was compared to 1 M NH<sub>4</sub>OAc, Mehlich 3 and 1M HNO<sub>3</sub> to characterize the release of soil K. Experiments were carried out on four soils receiving or not K (0 and 200 kg K<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>). On average, increasingly higher concentrations of soil K were extracted by EUF at 50 V and 20°C (21 mg kg<sup>-1</sup>), EUF at 200 V and 20°C (59 mg kg<sup>-1</sup>), EUF at 400 V and 80°C (68 mg kg<sup>-1</sup>), Mehlich 3 (202 mg kg<sup>-1</sup>), 1 M NH<sub>4</sub>OAc (214 mg kg<sup>-1</sup>) and 1 M HNO<sub>3</sub> (1808 mg kg<sup>-1</sup>). Significant correlation between grass K uptake and soil K was only obtained when the EUF technique was used. A high degree of linearity ( $0.94 < R^2 < 0.98$ ) of the amounts of EUF-K at 200 V and 20°C and time was observed. This indicates that the soils have high capacities to buffer soil solution K from rapidly and slowly exchangeable K sources. The EUF technique showed that the lack of forage response to K fertilizer was related to the large soil K reserves. Extraction of soil K with EUF may offer a more precise estimation of the K supplying capacities of the Abitibi-Temiscamingue soils than rapid chemical extractions.

**Keywords:** K-HNO<sub>3</sub>, K-Mehlich3, K-NH<sub>4</sub>OAc.

## INTRODUCTION

Fine-textured soils from Eastern Canada are not intensively weathered and still have important reserves of K in primary mineral forms (Al-Kanani et al. 1984; Simard et al. 1989). In particular, the soils of the Abitibi-Temiscamingue region, characterized with high clay and organic matter contents, have been brought to cultivation in the 1940's and are not yet well studied (Simard et al. 1989, 1992). A three-year- *in situ* study in the Abitibi-Temiscamingue region showed no response of forages to K fertilizer (annexe 2). The origin of the plant available-K, especially in slowly exchangeable form, has to be established to refine the K fertilizer recommendations for crops in this region.

Many chemical methods have been used to estimate the plant availability and the potential reserves of soil K. Calcium chloride ( $\text{CaCl}_2$ , 0.01 M) is often used to estimate K in soil solution whereas ammonium acetate ( $\text{NH}_4\text{OAc}$ , pH 7) extraction is used to estimate exchangeable K. The  $\text{HNO}_3$  is the most used extracting solution to estimate K reserves (Smith and Matthews 1957; Simard et al. 1991). These studies have shown that the amount of  $\text{HNO}_3$ -K was related to the uptake of non-exchangeable K by crops and to the clay content of the studied soils.

As an alternative to chemical extraction, the electro-ultrafiltration (EUF) technique has been used, especially in Europe and Asia, to estimate both the immediately available and the potentially available K (Nemeth 1979; Nemeth 1985). In Canada, however, few studies have been carried out with this technique (Tran et al. 1987; Simard et al. 1991; Liu et al. 1992). Compared to chemical extractions, the EUF technique has the advantage of sequentially estimating, on the same sample, the proportion of K present in the soil solution, the exchangeable form, and the non-exchangeable fraction (K in reserve). This characterisation is achieved by varying the desorption voltage, the contact time and the chamber temperature. Significant relationships between K desorbed by chemical extractions and by the EUF procedure were reported in the literature (Tran et al. 1987; Simard et al. 1991). For example, Tran et al. (1987) found that on Quebec soils, EUF-K measured at 50 V corresponded to 0.01 M  $\text{CaCl}_2$ -K while the total EUF-K extracted for

35 min at 50 (10 min), 200 (20 min) and 400 V (5 min) corresponded to 1 M  $\text{NH}_4\text{OAc-K}$ .

Many studies reported that EUF-K was more successful than  $\text{NH}_4\text{OAc-K}$  as an index of plant K availability (Sinclair 1980; Ramanathan and Nemeth 1982; Simonis and Nemeth 1985). Wanasuria et al. (1981), for example, found that EUF-extractable soil K was significantly correlated with rice yield response to K fertilizers whereas  $\text{NH}_4\text{OAc-K}$  was not. Richards and Bates (1989) also reported that 97% of variation in total K uptake by alfalfa was explained by EUF-K extracted at 200 and 400 V. Simard et al. (1991) concluded that K desorbed by EUF at 80°C was as effective as Mehlich 3-extractable K in predicting alfalfa K uptake in the first three cuts. The EUF desorption method may therefore be appropriate to explain the lack of response to K fertilizers of grass forage on the heavy clays of the Abitibi-Temiscamingue area. The objective of the present study was to compare the effectiveness of the EUF technique to chemical extractions as predictors of available K for forage grass produced *in situ* on four fine-textured Abitibi-Temiscamingue soils.

## MATERIALS AND METHODS

### Soil Characteristics and Field Experiments

Field experiments were conducted from 1994 to 1996 at four sites in the Abitibi-Temiscamingue area, province of Quebec, Canada. More details of the field experiments are presented in chapters two and three. Briefly, the sites were selected in 1993 from farmer fields. Timothy (*Phleum pratense* L.) was the dominant grass species except at Ste- Gertrude site where orchard grass (*Dactylis glomerata* L.) dominated. Physical and chemical properties of these soils are reported in Table 1. From 1994 to 1996, K was applied as muriate of potash at five rates (0, 50, 100, 150, and 200  $\text{kg ha}^{-1}$   $\text{K}_2\text{O}$ ). The treatments were arranged in a completely randomized block design in four replicates. Phosphorus and N fertilizers were respectively applied according to the Mehlich 3 soil test

and provincial recommendations (Conseil des Productions Végétales du Québec 1994). The forage was harvested twice a year from a 1.8 m<sup>2</sup> area. A 500 g sub-sample was taken for dry matter (DM) determination and dried at 55°C in a forced draft oven for three days. Plants were ground to pass a 1 mm screen in a Wiley mill. Total K content in forage tissue was determined by emission spectroscopy following a wet digestion with H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (Thomas et al. 1967). Potassium uptake was calculated by multiplying forage DM yield by its K concentration. Cumulative K uptake was obtained by adding the K uptake of the six harvests (two harvests per year).

Soil samples were taken from the 0-15 cm layer in May 1994 and August 1996. The treatments sampled were: K<sub>0i</sub> (control treatment in May 1994); K<sub>0f</sub> (control treatment in August 1996); and K<sub>5f</sub> (200 kg K<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup> treatment in August 1996).

### **Determination of Soil Properties and Laboratory Experiment**

Soil pH was measured in distilled water with a soil-solution ratio of 1:1. Organic matter contents were determined by wet oxidation (Tiessen and Moir 1993). Particle size analyses were determined by the hydrometer method after organic matter destruction (Sheldrick and Wang 1993). The amounts of Mehlich 3 extractable nutrients was determined according to Tran and Simard (1993). The content of P in the extracts was measured by colorimetry whereas metal concentrations were determined by flame spectroscopy. The cation exchange capacity (CEC) was determined 1M NH<sub>4</sub>OAc at pH 7 and soil-solution ratio of 6:25 (Hendershot et al. 1993).

### **Chemical Extractions**

The following chemical methods were used to estimate the K availability to plants:

- (1) K<sub>M3</sub>, Mehlich 3 with a soil-solution ratio of 1:10 and an equilibration time of 5 min (Tran and Simard 1993);

- (2)  $K_{\text{NH}_4\text{OAc}}$ , 1M  $\text{NH}_4\text{OAc}$  (pH 7) with a soil-solution ratio of 1:10 and a contact time of 15 min (Simard 1993);
- (3)  $K_{\text{HNO}_3}$ , boiling 1 M  $\text{HNO}_3$  with a soil-solution ratio of 1:10 and a boiling time of 10 min (Knudsen et al. 1982).

### **EUF Procedure**

Potassium release was studied using the EUF technique (Nemeth 1979) with an automatic EUF apparatus (Model 683, Vogel Co., Giessen, Germany). Extracts from the anode and cathode of each fraction were combined in volumetric flasks and K concentrations were determined by flame spectroscopy. Two experiments were replicated three times using the EUF technique with a soil-water ratio of 4:60.

#### **(1) Standard EUF Procedure**

Potassium was successively extracted in three fractions: (i) 10 min at 50 V, 20°C, and <15 mA ( $K_{50}$ ); (ii) 20 min at 200 V, 20°C and <15 mA ( $K_{200}$ ); and (iii) 5 min at 400 V, 80°C and <150 mA ( $K_{400}$ ).

The sum of  $K_{50}$  and  $K_{200}$  is  $K_{(50+200)}$  whereas the total of  $K_{50}$ ,  $K_{200}$  and  $K_{400}$  was referred as  $K_{\text{EUF}}$ .

According to Nemeth (1985), an EUF ratio ( $K_Q$ ) was defined as follows:

$K_Q = K_{400} / (K_{(50+200)})$ ; this ratio reflects the characteristics of the soil K supply, *i.e.*, clay content and K reserve.

#### **(2) Potassium Reserve Characterization**

To further characterize the soil K reserves, K was successively extracted from the  $K_{0i}$  treatment during 75 min in two fractions (i) every 5 min during 60 min at 200 V, 20°C and <15 mA ( $K_{0-60}$ ); (ii) every 5 min during 15 min at 400 V, 80°C and <150 mA ( $K_{60-75}$ ).



### Statistical Analyses

To study the effects of K application on the amount of K desorbed by the different procedures, an analysis of variance was carried out using the GLM procedure of SAS (SAS Institute Inc. 1990). Two orthogonal contrasts were used in order to compare the treatments ( $K_{0i}$  vs.  $K_{0f}$ ;  $K_{0i}$  vs.  $K_{5f}$ ). To characterize the K reserves, cumulative K release by EUF( $K_{0-60}$ ) was plotted against time and described by linear regression. The amount of K desorbed by chemical extractants and EUF fractions was related to the cumulative grass K uptake by simple linear correlation.

## RESULTS AND DISCUSSION

### Soil Characteristics

Studied soils (Humic Gleysols) were slightly acidic (Ste-Gertrude) to slightly alkaline (Laverlochere). They have high organic matter contents, particularly at Laverlochere, and the soils from Abitibi (Ste-Gertrude and Palmarolle) have higher clay contents than those from Temiscamingue (Laverlochere and Lorrainville). All soils can be classified as rich in Mehlich 3 extractable K contents in relation to forage needs (Conseil des Productions Végétales du Québec 1994). They also have high extractable Ca and Mg contents (Table 1). According to Simard et al. (1991), the clay mineralogy of these soils is dominated by vermiculite, chlorit, and hydrous mica. At the beginning of the experiment ( $K_{0i}$  treatment), increasingly higher concentrations of soil K were extracted by EUF at 50 V and 20°C (16 mg kg<sup>-1</sup>), EUF at 200 V and 20°C (53 mg kg<sup>-1</sup>), EUF at 400 V and 80°C (66 mg kg<sup>-1</sup>), Mehlich 3 (193 mg kg<sup>-1</sup>), 1 M NH<sub>4</sub>OAc (205 mg kg<sup>-1</sup>), and 1 M HNO<sub>3</sub> (1807 mg kg<sup>-1</sup>).

### Potassium Status of Studied Soils

On average, when  $200 \text{ kg K}_2\text{O ha}^{-1}\text{yr}^{-1}$  were applied, increasingly higher amounts of soil K were extracted by EUF at 50 V and  $20^\circ\text{C}$  ( $30 \text{ mg kg}^{-1}$ ), EUF at 200 V and  $20^\circ\text{C}$  ( $79 \text{ mg kg}^{-1}$ ), EUF at 400 V and  $80^\circ\text{C}$  ( $81 \text{ mg kg}^{-1}$ ), Mehlich 3 ( $238 \text{ mg kg}^{-1}$ ), 1 M  $\text{NH}_4\text{OAc}$  ( $258 \text{ mg kg}^{-1}$ ), and boiling 1 M  $\text{HNO}_3$  ( $1854 \text{ mg kg}^{-1}$ ). Using 30 different soils from Quebec, Simard et al. (1991) reported similar trends of results with lower amounts of K contents especially for  $\text{K}_{\text{HNO}_3}$ . The difference with our results is mainly explained by the large variation of clay contents of soils used in Simard's study ( $44\text{--}774 \text{ mg kg}^{-1}$ ). More specifically, however, more K was desorbed at 400 V and  $80^\circ\text{C}$  from the two Abitibi-Temiscamingue soils used in Simard's study ( $268$  and  $158 \text{ mg kg}^{-1}$ ) than in the present study ( $68 \text{ mg kg}^{-1}$  on average). This may be partly explained by the five sequential desorptions of 5 min at 400 V and  $80^\circ\text{C}$  used in Simard's study compared to only one desorption of 5 min in the present study.

The K fertilizer addition had a significant effect on the amount of soil K extracted by the selected methods except for  $\text{K}_{\text{HNO}_3}$  (Table 2). Indeed, the K application ( $\text{K}_{5f}$ :  $200 \text{ kg ha}^{-1} \text{ K}_2\text{O yr}^{-1}$ ) resulted in an increase in each fraction of extractable soil K at each site (Table 3). A small decrease of each fraction of soil K content was observed after the three year study at each site (Table 3). However, no statistically significant difference between  $\text{K}_{0i}$  and  $\text{K}_{0f}$  in any of the soil K measurements was found. The difference between K desorbed by EUF ( $\text{K}_{\text{EUF}}$ ) from  $\text{K}_{0i}$  and  $\text{K}_{0f}$  was  $16 \text{ mg kg}^{-1}$  (Table 3) and was comparable to that extracted by Mehlich 3 ( $18 \text{ mg kg}^{-1}$ ) while cumulative K uptake was on average about  $371 \text{ mg kg}^{-1}$ . These results indicate that the studied soils have high buffering capacity since the soluble K fraction was slightly affected by K removed by forages.

The quantities of K desorbed by EUF from the soils in each time interval were added and plotted against the extraction time (Fig. 1). After 75 minutes, the cumulative K desorbed by EUF varied from  $91 \text{ mg K kg}^{-1}$  (Ste-Gertrude) to  $241 \text{ mg K kg}^{-1}$  (Palmarolle). About 54% of cumulative K was desorbed after 60 min at 200 V and  $20^\circ\text{C}$ . Richards and Bates (1989) mentioned that similar amounts of K were desorbed at 400 V and  $80^\circ\text{C}$  for

30 min than at 200 V and 20°C for the same period. Results of our study are not surprising since the clay mineralogy of most Abitibi-Temiscamingue soils is dominated by vermiculite and hydrous mica (Simard et al. 1991). The micas and weathering products in the soils developed from the Canadian shield are of trioctahedrate nature (Simard et al. 1992). They have high rates of release from slowly exchangeable fractions. High rates of desorption by EUF at 400 V and 80°C of soils rich in vermiculite and hydrous mica were also reported by Nemeth (1982). In contrast, most of K is desorbed by EUF at 200 V and 20°C in soils where the dominant clay mineral is kaolinite.

The high proportion of  $K_{60-75}$  to total K desorbed by EUF at 400 V and 80°C suggests that the studied soils have a high K reserves. This agrees with the data from the 1M HNO<sub>3</sub> extracts (Table 3) where Ste-Gertrude had the lowest K content whereas Palmarolle showed the highest. The cumulative concentration of K desorbed by EUF at 200 V and 20°C (EUF<sub>0-60</sub>) linearly increased with desorption time for all sites (Fig. 2;  $0.94 < R^2 < 0.98$ ;  $P < 0.001$ ). These results are in agreement with those of Simonis and Nemeth (1985). Richards and Bates (1989) also observed a linear relationship between the K released at 20°C and the desorption time.

The  $K_Q$  (Table 3), a ratio reflecting the characteristics of soil K supply, varied between 0.69 and 1.24 for  $K_{0i}$  (Table 3). A close relationship was previously reported between  $K_Q$  and clay content (Simard et al. 1991). The values observed for three of the four soils of the present study are in the very high range of those reported by Simard et al. (1991) and indicate very large K reserves at the beginning ( $K_{0i}$ ) and even at the end of the experiment for the unamended soils ( $K_{0f}$ ). The analysis of variance presented in Table 2 showed that K fertilizer had a significant effect on  $K_Q$  and the contrast  $K_{0i}$  vs  $K_{5f}$  was also significant. Indeed,  $K_Q$  varied between 0.48 to 0.91 when 200 kg K<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup> were applied. The lowest  $K_Q$  was obtained than the Lorrainville soil (Table 3). This is explained by the lowest  $K_{400}$  (58 mg kg<sup>-1</sup>) obtained in this site compared to the other sites. Simonis and Nemeth (1985) reported that when  $K_Q$  value is higher than 0.6, soils should have high K reserves and a high capacity to continuously supply K to plants. In our study, most  $K_Q$

values obtained from the  $K_{0i}$  treatment are greater than 0.6 indicating that studied soils have a high capacity to supply K to forage produced during the experiment.

### **Relationship Between K Desorbed by EUF and by Chemical Extractions**

The amounts of K removed by each fraction of EUF were significantly correlated with the amounts of K extracted by Mehlich 3 and 1 M  $\text{NH}_4\text{OAc}$ . Mehlich 3 and 1 M  $\text{NH}_4\text{OAc}$  extracted more K than EUF at 20°C ( $K_{(50+200)}$ ). Comparable amounts of K were extracted by Mehlich 3 (202 mg kg<sup>-1</sup>) and 1 M  $\text{NH}_4\text{OAc}$  (214 mg kg<sup>-1</sup>) as reported by Tran and Simard (1993). In addition, the amount of K extracted at 400 V and 80°C ( $K_{400}$ ) appeared to be more closely related to  $K_{\text{M3}}$  and  $K_{\text{NH}_4\text{OAc}}$  than the other fraction of K extracted by EUF ( $r = 0.77^{**}$  and  $0.81^{**}$ , respectively). These results are in agreement with previous studies on Eastern Canada soils (Tran et al. 1987; Simard et al. 1991; Liu et al. 1992). Since Mehlich 3 uses  $\text{NH}_4^+$  and our soils contain vermiculite, the results are not surprising. The  $\text{NH}_4^+$  (atomic radius similar to that of  $\text{K}^+$ ) is able to exchange with K in the "K-specific wedge zones" of soils dominated by vermiculite (Simard et al. 1991). Nemeth (1982) also found that the amount of K extracted by EUF at 20°C was function of the mineralogy of the clay fraction. In soils containing large amounts of illite, EUF at 20°C desorbed about 37% of the  $\text{NH}_4\text{OAc}$  exchangeable K. Our soils contained large amounts of illite and vermiculite (Simard et al. 1991) and EUF at 20°C desorbed on average about 37% of the  $\text{NH}_4\text{OAc}$  exchangeable K (Table 3). On average 69 mg kg<sup>-1</sup> were desorbed by EUF at 20°C ( $K_{(50+200)}$ ) from the control treatments. This finding may explain the lack of forage response to K fertilizer and confirms the results of research previously conducted in Quebec with alfalfa which indicated that 150 kg ha<sup>-1</sup> K from clay soil was available every year for plant uptake (CPVQ 1996).

Results presented in Table 4 also indicated that there is no relationship between K desorbed by EUF and K extracted by 1M  $\text{HNO}_3$  and fixed-K as estimated by the difference between K extracted by  $\text{HNO}_3$  and  $\text{NH}_4\text{OAc}$ . These results may be partly

explained by the smaller K desorbed by EUF especially at 400 V and 80°C which, generally, indicates K in reserve (Table 3). In addition, the amount of  $K_{EUF}$  was lower than that extracted by 1 M  $NH_4OAc$  and indicated that only exchangeable K was desorbed by EUF. It was reported that K extracted by EUF at 400 V and 80°C during 5 min is mainly function of the exchangeable K pool and only remove a small portion of non-exchangeable K (Sinclair 1980, 1982; Venter 1985). Previous work on a wider range of soil clay contents reported a high correlation between K extracted at 400 V and 80°C and K extracted by 1 M  $HNO_3$  (Tran et al. 1987; Richards and Bates 1989; Simard et al. 1991).

### **Relationship between Different Potassium Availability Indices and Grass K Uptake**

The cumulative forage K uptake at each site was higher in the fertilized ( $K_{Sf}$ ) than in the control treatments ( $K_{0i}$ , Table 3). The mean cumulative K uptake by grass from the control treatment was  $371 \text{ kg ha}^{-1}$ . It ranged from  $278 \text{ kg ha}^{-1}$  for the  $K_{0i}$  treatment at Ste-Gertrude to  $517 \text{ kg ha}^{-1}$  for the  $K_{Sf}$  at Lorrainville (Table 3). At Ste-Gertrude, the K uptake was the lowest of all sites. This may be explained by a lower labile soil K content at this site compared to the other sites as indicated by the K extracted by EUF ( $K_{50}$ ,  $K_{200}$ ,  $K_{(50+200)}$ ,  $K_{EUF}$ ; Table 3).

Cumulative forage K uptake was better predicted by the amount of soil K desorbed by EUF than by chemical methods. Results presented in Table 5 show a significant correlation between cumulative forage K uptake and  $K_{50}$ ,  $K_{200}$ ,  $K_{(50+200)}$ , or  $K_{EUF}$ . These results extend to field situations data from previous studies in controlled conditions (Nemeth 1979; Wanasuria et al. 1981; Simard et al. 1991). No significant correlation was found between K uptake and  $EUF_{400}$  (Table 5). The best correlation was obtained with  $K_{50}$  after 10 min of desorption. Sinclair (1980) found that the amount of K desorbed by EUF during 10 min was better related to K uptake of a first cut of ryegrass than to K extracted with  $NH_4OAc$ . Nemeth (1979) indicated that plant available K corresponds to EUF-K extracted at 50 and 200 V and 20°C while EUF-K measured at

400 V and 80°C gives the K reserves. Tran et al. (1987) reported that K extracted by  $\text{NH}_4\text{OAc}$  and  $\text{EUF}_{(50+200+400)}$  can adequately predict the K uptake by ryegrass. Simard and Zizka (1994), however, reported that 0.002 M  $\text{SrCl}_2$ , a close approximation of soil solution K, was less efficient in predicting K available to alfalfa in greenhouse than stronger extractants such as Mehlich 3 or 1 M  $\text{NH}_4\text{OAc}$ .

Results presented in Table 5 also show no significant correlation between K extracted by chemical methods and cumulative forage K uptake. These results agree with those of Richards and Bates (1989) who reported more success of the EUF technique than the chemical extraction.

### CONCLUSION

In the present study, the EUF desorption technique was found to be a better soil-test than 1 M  $\text{NH}_4\text{OAc}$ , Mehlich 3, and 1 M  $\text{HNO}_3$  to predict plant available K since this extraction technique explained the most variation in cumulative forage K uptake. About 53% of the variation in K uptake was explained by K extracted with EUF at 50 V and 20°C. The high degree of linearity obtained between the amounts of EUF-K at 200 V and 20°C and time ( $0.94 < R^2 < 0.98$ ) indicated that studied soils have high capacities to buffer soil solution K from rapidly exchangeable K sources. The EUF desorption studies showed that the soils of the Abitibi-Temiscamingue area have important reserves of K. The EUF technique along with the results from the chemical extraction methods suggests that the lack of forage response to K fertilizer was related to the large soil K reserves. Extraction of soil K with EUF may offer a more precise estimation of the K supplying capacities of the Abitibi-Temiscamingue soils than rapid chemical extractions.

## REFERENCES

**Al-Kanani, T., MacKenzie, A. F. and Ross, G. J. 1984.** Potassium status of some Québec soils: K released by nitric acid and sodium tetraphenylboron as related to particle size and mineralogy. *Can. J. Soil Sci.* **64**: 99-107.

**Conseil des Productions Végétales du Québec. 1994.** Grilles de Références en Fertilisation. Agdex 540. Gouvernement du Québec, Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation. 128pp.

**Conseil des Productions Végétales du Québec. 1996.** Grilles de Références en Fertilisation. Agdex 540. Gouvernement du Québec, Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation. 128pp.

**Hemlke, P. A. and Sparks, D. L. 1996.** Lithium, Sodium, Potassium, Rubidium, and Cesium. Pages: 551-574. *in* D. L. Sparks ed. *Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical methods.* SSSA, SSSA and ASA. Madison, WI. USA.

**Hendershot, W. H., Lalonde, H. and Duquette, M. 1993.** Ion exchange and exchangeable cations. Pages: 173-176 *in* M. R. Carter, ed. *Soil sampling and methods of analysis.* Canadian Society of Soil Science. Lewis Publishers, Boca Raton, FL.

**Knudsen, D., Peterson, G. A. and Pratt, P. F. 1982.** Lithium, sodium and Potassium. *In* *Methods of Soils Analysis.* Ed. A. L. Page. pp 225-246. *Agronomy 9, part 2.* Am.Soc. Agron., Madison, WI.

**Liu, L., Bates, T. E. and Tran, T. S. 1992.** Prediction of Available Potassium in Ontario Soils by Electro-ultrafiltration and Chemical Extraction. *Can. J. Soil Sci.* **72**: 159-167.

**Nemeth, K. 1979.** The Availability of Nutrients in The Soil as determined by Electro-ultrafiltration (EUF). *Advances in Agronomy* **31**:155-188.

**Nemeth, K. 1982.** Electro-ultrafiltration of aqueous soil suspensions with simultaneous varying temperature and voltage. *Plant and Soil* **64**: 7-23

**Nemeth, K. 1985.** Recent Advances in EUF Research (1980-1983). *Plant and Soil* **83**: 1-19.

**Ramanathan, K. W. and Nemeth, K. 1982.** EUF-K as a measure of K availability index for Tamil Nadu Soil (India). *Plant Soil*. **64**: 95-104.

**Richards, J. E. and Bates, T. E. 1989.** Studies on the potassium-supplying capacities of southern Ontario soils. III. Measurement of available K. *Can. J. Soil Sci.* **69**: 597-610.

**SAS Institute Inc. 1990.** SAS/STAT user's guide, Version 6, ed. SAS Institute Inc., Cary, NC.

**Sheldrick, B.H. and Wang, C. 1993.** Particle size distribution. Pages: 499-511 *in* M. R. Carter, ed. *Soil Sampling and Methods of Analysis*. Canadian Society of Soil Science. Lewis Publishers, Boca Raton, FL.

**Simard, R. R. 1993.** Ammonium acetate-extractable elements. Pages 39-49. *in* M. R. Carter, ed. *Soil Sampling and Methods of Analysis*. Canadian Society of Soil Science. Lewis Publishers, Boca Raton, FL.

**Simard, R. R., Zizka, J. 1994.** Evaluating plant available potassium with Strontium citrate. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* **25**: 1779-1789.

**Simard, R. R., Zizka, J. and DeKimpe, C. R. 1990.** Le prélèvement du K par la luzerne (*Medicago sativa* L.) et sa dynamique dans 30 sols du Québec. *Can. J. Soil Sci.* **70**: 379-393.

**Simard, R. R., C. R. DeKimpe and J. Zizka. 1992.** Release of potassium and magnesium from soil fractions and its kinetics. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **56**: 1421-1428.

**Simard, R. R., Tran, T. S. and Zizka, J. 1991.** Evaluation of the electro-ultrafiltration technique (EUF) as a measure of the supplying power of Quebec soils. *Plant and Soil* **132**: 91-101.

**Simard, R. R., Zizka, J. and DeKimpe, C. R. 1989.** The Kinetics of Non-Exchangeable Potassium and Magnesium Release From Québec Soils. *Can. J. Soil Sci.* **69**: 663-675.

**Simonis, A. D. and Nemeth, K. 1985.** Comparative study on EUF and other methods of soil analysis for the determination of available potassium in soils from Northern Greece. *Plant Soil* **83**: 93-106.

**Sinclair, A. H. 1980.** Desorption of cations from Scottish soils by electro-ultrafiltration. *J. Sci. Food Agric.* **31**: 532-540.

**Sinclair, A. H. 1982.** A comparison of electro-ultrafiltration and quantity/intensity measurements of soil potassium with its uptake by ryegrass in Scottish soils. *Plant Soil* **64**:



85-94.

**Smith, J. A. and Matthews, B. C. 1957.** Release of potassium by 18 Ontario soils during continuous cropping in the greenhouse. *Can. J. Soil. Sci.* **37**: 1-10.

**Thomas, R. L. Sheard, R. W and Moyer, J. R. 1967.** Comparison of conventional and automated procedure for nitrogen, phosphorus and potassium analysis of plant material using a simple digestion. *Agron. J.* **59**: 240-243.

**Tiessen, H. and Moir, J. O. 1993.** Total and Organic Carbon. Pages: 187-199 *in* M. R. Carter, ed. *Soil Sampling and Methods of Analysis*. Canadian Society of Soil Science. Lewis Publishers, Boca Raton, FL

**Tran, T. S. and 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, FL

**Tran, T. S., Tabi, M. and DeKimpe, C. R. 1987.** Relation du potassium extrait par EUF et quelques méthodes chimiques avec les propriétés du sol et le rendement des plantes. *Can. J. Soil Sci.* **67**: 17-31.

**Van Lierop, W. and Tran, T. S. 1985.** Comparative potassium levels removed from soil by electro-ultrafiltration and some chemical extractants. *Can. J. Soil Sci.* **65**: 25-34.

**Venter, G. C. H. 1985.** The relationship between EUF-K and soil fractions of different selectivity. *Plant Soil* **83**: 201-205.

**Wanasuria, S., De Datta, S. K. and Mengel, K. 1981.** Rice yield in relation to electro-ultrafiltration extractable soil potassium. *Plant and Soil* **59**: 23-31.

### LIST OF FIGURES

**Fig. 1:** Amount of K extracted by Electro-ultrafiltration (EUF) from the control (soil sampled in May 1994). Extraction at 200 V and 20°C during 60 min (EUF<sub>0-60</sub> fraction); extraction at 400 V and 80°C during 15 min (EUF<sub>60-75</sub> fraction).

**Fig. 2:** Amount of cumulative K extracted by Electro-ultrafiltration from the control (soil sampled in May 1994) vs. time. Extraction at 200 V and 20°C during 60 min (EUF<sub>0-60</sub> fraction).

Table 1: Chemical and physical properties of the studied soils

site	Ste-Gertrude	Palmarolle	Laverlochere	Lorrainville
pH (eau)	5.9c	6.0bc	7.2a	6.3b
O.M <sup>z</sup> (g kg <sup>-1</sup> )	45.0bc	62.0b	118.0a	52.0bc
CEC <sup>y</sup> (cmol (+) kg <sup>-1</sup> )	36.82b	41.14a	35.0a	24.4c
<b>Particle size distribution (g kg<sup>-1</sup>)</b>				
Clay	860a	850a	700b	700b
Sand	18b	26a	15b	28a
Silt	122b	124b	285a	272a
<b>Mehlich 3 (mg kg<sup>-1</sup>)</b>				
K	180b	190b	232a	135c
Ca	2604b	2859b	5609a	2250c
Mg	518a	535a	520a	367b
<b>NH<sub>4</sub>OAc (mg kg<sup>-1</sup>)</b>				
K	193b	168c	189b	244a
Ca	2629c	3918b	5926a	1976d
Mg	538a	524a	508b	366c
<b>HNO<sub>3</sub> (mg kg<sup>-1</sup>)</b>				
K	1320c	2362a	1707b	1839b
Ca	3200c	5108b	9475a	3071c
Mg	5773c	8566a	5290c	6248b

<sup>z</sup>O.M = Organic matter

<sup>y</sup>CEC = Cation exchange capacity

Within a same line, means followed by the same letter are not statistically different at P = 0.05 according to the least significant difference test.

Table 2: Effects of K application (Mean square values) on K extracted by selected procedures, cumulative grass yield, cumulative K-uptake and  $K_Q$

Source of Variation	df	$K_{50}(x10^3)$	$K_{M3}(x10^3)$	$K_{200}(x10^3)$	$K_{(50+200)}(x10^3)$	$K_{400}(x10^3)$	$K_{HNO_3}(x10^3)$	$K_{EUF}(x10^3)$	$K_Q$	$K_{NH_4OAc}$ ( $x10^3$ )	K-uptake( $x10^6$ )
Treatments (T)	2	0.79***	12.56***	3.88**	8.02***	1.45**	25.90	16.23***	0.26**	6.32*	0.02
Replicates	2	0.02	0.61	0.09	0.03	0.04	74.19	0.1	0.01	0.003	0.002
Sites (S)	3	0.21**	0.60	0.10	0.55	1.69**	696.59***	2.5	0.26**	0.15	0.004**
T* S	6	0.03	1.83	0.28	0.47	0.61	138.72	1.4	0.13	5.81**	0.0004
<b>Contrasts</b>											
$K_{0f}$ vs. $K_{0f}$	1	0.001	1.84	0.55	0.49	0.23	12.38	1.4	0.001	1.88	
$K_{0f}$ vs. $K_{5f}$	1	1.14***	23.60***	7.27**	14.18***	2.73**	51.80	29.37***	0.41**	12.43**	0.03

\*\*\*, \*\* Significant at P = 0.001 and 0.01 respectively.

$K_{50}$  = K extracted at 50 V during 10 min.

$K_{200}$  = K extracted at 200 V during 30 min.

Table 3. Amounts of K extracted by selected procedures,  $K_Q$  and cumulative K uptake by forage grass from the studied soils

Sites	treat <sup>2</sup> .	$K_{50}$	$K_{200}$	$K_{400}$	$K_{(50+200)}$ mg kg <sup>-1</sup>	$K_{EUF}$	$K_{M3}$	$K_{NH_4OAc}$	$K_{HNO_3}$	$(K_{HNO_3} + K_{NH_4OAc})$	Cumulative K	
											Uptake (kg ha <sup>-1</sup> )	$K_Q$
Ste-Gertrude	$K_{0t}$	11	41	61	52	113	180	201	1320	1119	-	1.24
	$K_{0r}$	11	39	52	50	102	161	183	1518	1335	278	1.04
	$K_{5r}$	31	87	93	118	210	267	300	1904	1604	348	0.80
Palmarolle	$K_{0t}$	13	40	69	53	122	195	199	2198	1999	-	1.30
	$K_{0r}$	13	60	46	73	118	190	186	2362	2176	371	0.63
	$K_{5r}$	21	69	76	90	166	220	242	1956	1714	440	0.84
Laverlochere	$K_{0t}$	20	65	100	86	186	232	250	1707	1457	-	1.17
	$K_{0r}$	18	46	65	64	130	166	180	1518	1338	414	1.01
	$K_{5r}$	31	76	96	107	202	236	249	1577	1328	466	0.90
Lorraineville	$K_{0t}$	19	48	55	67	122	169	182	1839	1657	-	0.82
	$K_{0r}$	22	50	51	73	123	178	158	1812	1654	419	0.70
	$K_{5r}$	37	84	58	121	179	228	240	1981	1741	517	0.48
mean (all soils)	$K_{0t}$	16	49	71	64	136	194	208	1766	1558	-	1.11
	$K_{0r}$	16	49	53	65	118	174	177	1803	1626	371	0.82
	$K_{5r}$	30	79	81	109	189	238	258	1854	1597	443	0.74
mean (all soils and treatments)		21	59	68	79	148	202	214	1808	1593	-	0.89

<sup>2</sup> = treatments

Table 4: Correlation coefficients between K extracted by EUF and by chemical methods

EUF fraction	Mehlich 3	NH <sub>4</sub> OAc	HNO <sub>3</sub>	HNO <sub>3</sub> -NH <sub>4</sub> OAc
50 V	0.76***	0.69***	-0.09	-0.11
200 V	0.75***	0.66***	0.14	0.13
400 V	0.77***	0.81***	-0.13	-0.14
(50+200)	0.80***	0.72***	0.08	0.06
(50+200+400)	0.89***	0.85***	-0.009	-0.02

\*\*\* Significant at P <0.001

Table 5: Simple correlation (r) between cumulative forage K uptake and K extracted by EUF and chemical methods

Method	r
<b>EUF fraction</b>	
50 V	0.53***
200 V	0.38**
400 V	0.08
(50 + 200) V	0.45**
(50+200+400) V	0.37**
<b>Chemical methods</b>	
Mehlich 3	0.21
1 M NH <sub>4</sub> OAc	0.14
1 M HNO <sub>3</sub>	0.24

\*\*\*, \*\* significant at P<0.001 and P<0.01

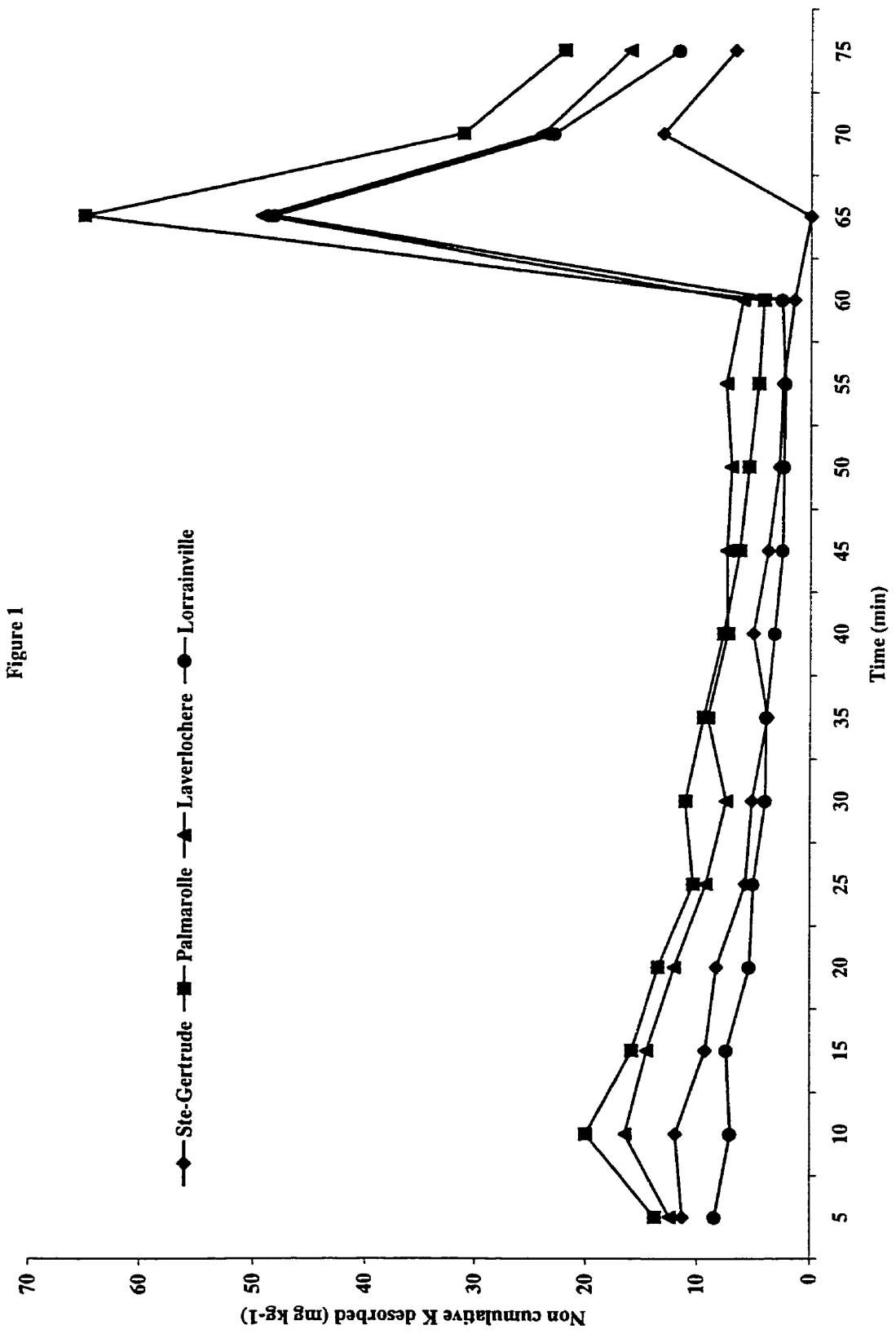
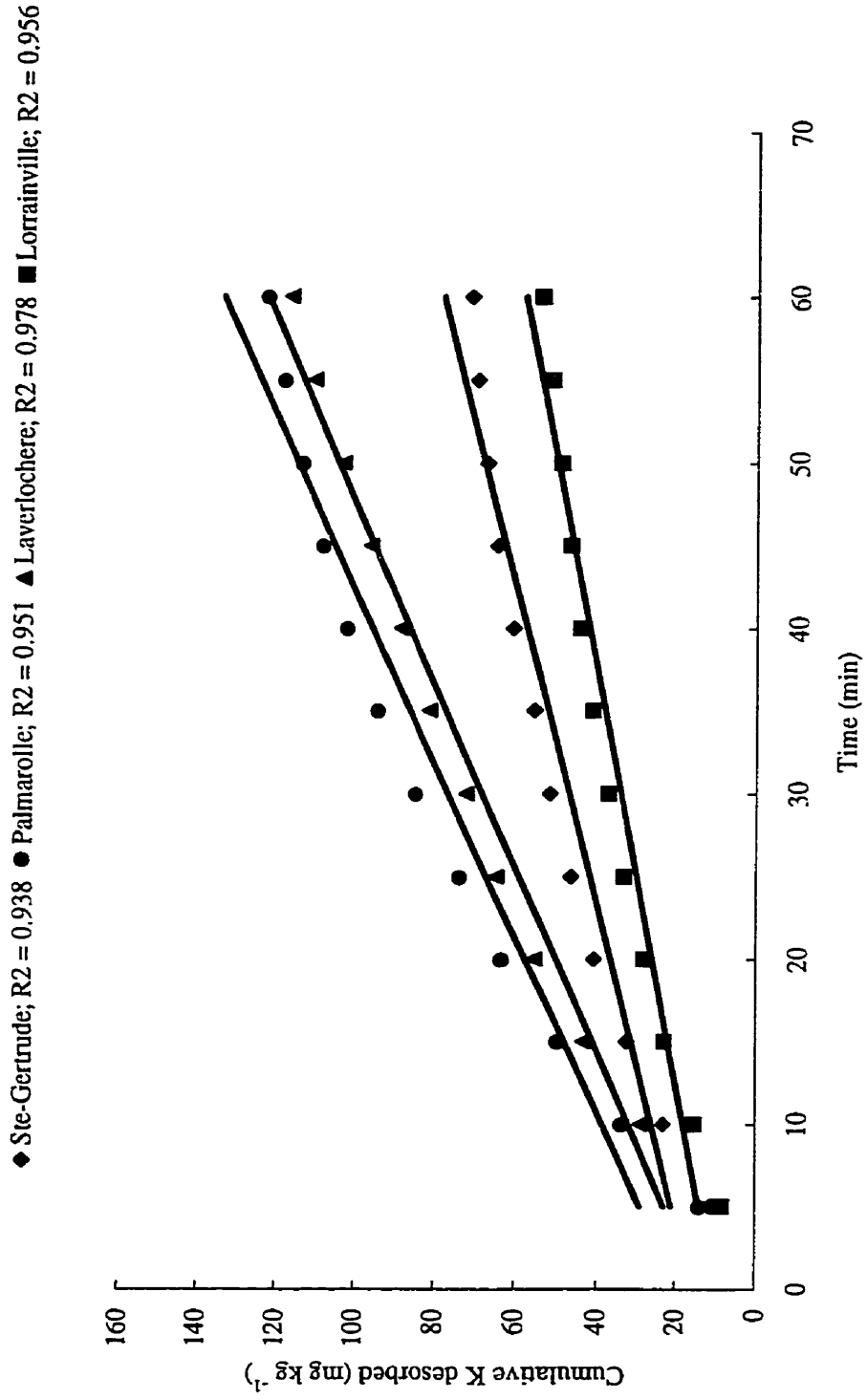


Figure 1



Figure 2



Dans le chapitre VI, la technique d'Électro-ultrafiltration (EUF) a démontré que le manque de réponse des fourrages à l'engrais potassique est attribuable à la richesse naturelle des sols étudiés en K. Toutefois, le taux du K désorbé dans la solution du sol, essentiellement à partir des formes échangeables, représente un facteur limitant le prélèvement total de K par les plantes à long terme. La disponibilité de K pour les plantes est fortement liée à son taux de libération dans le sol qui dépend de sa liaison avec les minéraux. La connaissance de ce taux de libération a été rendue possible grâce aux études de cinétique qui sont généralement plus efficaces pour prédire la disponibilité des nutriments aux plantes que les études statiques. Ainsi, la technique d'EUF a été utilisée pour étudier la cinétique de désorption du K des quatre sols.

## **CHAPITRE VII**

**MODÈLES MATHÉMATIQUES DÉCRIVANT LA CINÉTIQUE DE  
DÉSORPTION DU POTASSIUM PAR ÉLECTRO-ULTRAFILTRATION**

## RÉSUMÉ

Le taux de potassium désorbé dans la solution du sol, essentiellement à partir des formes lentement échangeables est un facteur limitant le prélèvement total de K par les plantes à long terme. La disponibilité de K pour les plantes est fortement liée à son taux de libération qui dépend du type des minéraux présent dans le sol. La technique d'Électro-Ultrafiltration (EUF) a été utilisée pour étudier la cinétique de désorption de K sur quatre sols (Gleysols Humique) de l'Abitibi-Témiscaminque (Québec, Canada). Le potassium a été désorbé à partir de quatre sols ayant reçu 200 kg K<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup> durant trois années et à partir d'un témoin et ce durant 58 min (4 + 4 et chaque 5 minutes par la suite) à 400 V et 80°C. Le K désorbé a varié entre 199 et 342 mg kg<sup>-1</sup> suivant le site et les traitements. La quantité cumulative de K désorbé a été décrite par des équations de fonction de puissance, d'ordre zéro, d'Elovich, de diffusion parabolique et de premier ordre. L'équation de premier ordre a mieux décrit les données. Un modèle incrémentiel de premier ordre a également été testé et s'est avéré plus efficace à décrire les données que les modèles cumulatifs. L'étude de cinétique avec l'EUF a démontré que le manque de réponse des fourrages de graminées à l'apport des engrais potassiques est attribuable à la richesse en K rapidement et lentement échangeable de ces sols très argileux.

**Mots-clés:** Potassium, Désorption, Modèle Cumulatif, Modèle incrémentiel.

**Auteurs:** Ziadi, N., R. R. Simard, T. S. Tran et G. Allard.

À soumettre au journal 'Soil Sci. Soc. Am. J.'

## Mathematical models for potassium release kinetics using Electro-ultrafiltration

### ABSTRACT

The rate of potassium (K) release in soil solution, especially from slowly exchangeable forms, can be limiting to plant K uptake on a long-term basis. The availability of this K is closely related to its release rate which greatly depends on the type of K bearing minerals. The Electro-ultrafiltration (EUF) technique was used to kinetically characterize the K release from four soils (Humic Gleysols) located in Abitibi-Temiscamingue (Quebec, Canada). Potassium was desorbed from four soils that had received 200 kg K<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup> during three growing seasons (1994-1996) and from an unfertilized control. The desorption was carried out for 58 min (4 + 4, and every 5 min thereafter) at 400 V and 80°C. The amount of K desorbed varied between 199 and 342 mg kg<sup>-1</sup> depending on sites and treatments. Cumulative K desorption curves were described by the following equation: power function, zero-order, Elovich, parabolic, and the first order, with the latter showing the best fit. An incremental first-order model was also tested and better described the data than cumulative models. The kinetic study using the EUF technique showed that the lack of forage yield response to K fertilizer was related to the large K reserves as rapidly and slowly exchangeable forms of these fine clay soils.

**Key words:** Potassium, Desorption, Cumulative model, Incremental model.

## INTRODUCTION

The rate of potassium release from the solid phase to soil solution, especially from the slowly and non-exchangeable forms, may significantly contribute to plant K uptake from soils (Lanyon and Smith 1985). However, the slowly exchangeable K is not considered in most soil tests to assess the available K to plants. This may explain the poor relationships between soil test data and crop response that are sometimes reported. For example, Mengel and Uhlenbecker (1993) reported no relationship between various soil test K methods and cereal response to K fertilizer. In soils in which 2:1 phyllosilicates, such as vermiculite and hydrous mica, dominate in the clay fraction, the quantity of slowly-exchangeable interlayer K is much larger than the amount of K taken up by plants and may contribute to most of the crop needs (Sparks 1995). The availability of this soil K plants is closely related to its release rate from the non-exchangeable fraction which greatly depends on the type of K-bearing minerals (Sparks 1995).

Some chemical extraction methods, such as HNO<sub>3</sub> (1M) and HCl (1M), are used to assess the fraction of non-exchangeable K which is available to plants (Tran et al. 1987; Helmke and Sparks 1996; Pineiro and Navarro 1997). Others studies, however, reported that these extractants were not reliable for estimating the plant available K from non-exchangeable sources (Kong and Steffens 1989 and von Boguslawski and Lach 1971 cited by Mengel and Unlenbecker 1993). This difference in results is partly related to neglecting the rate of K release of non-exchangeable form by these static soil testing methods (Simard et al. 1990; Simard et al. 1991; Cox and Joern 1997).

Kinetic studies may to be more appropriate than static studies to estimate the amount of soil K potentially available to plants, especially from the slowly and non-exchangeable pools (Barber 1995). Martin and Sparks (1983) suggested that the K supplying capacity of soil may be better charaterized by measuring either the non-exchangeable K reserves or the kinetics of K release than by measuring exchangeable K, especially in soils that contain large amounts of hydrous mica. Many studies have successfully attempted to predict soil K availability using the K release rate derived from

kinetic studies as an index of plant K availability (Havlin and Westfall 1985; Pineiro and Navarro 1997).

The Electro-Ultrafiltration (EUF) technique have been used as an alternative to chemical extractants to describe the potentially available, reserve K (Nemeth 1979) and to study the kinetics of nutrient release from soils (Nemeth 1985; Simard et al. 1992). Mengel and Uhlenbecker (1993) used the EUF technique to measure the K release rate from non-exchangeable soil forms and to evaluate their availability to ryegrass (*Lolium perenne* L.). They found that K uptake by ryegrass was well correlated with the K release rate as evaluated by the parabolic diffusion equation and they concluded that the K release rate represents a reliable indicator for the availability of non-exchangeable soil K.

To kinetically describe the release of elements from soils, conventional models based on cumulative data are often used. However, these models have some limitations such as the necessity of estimating missing data and the interdependence of observation errors (Ellert and Bettany 1988). Comparisons between fitting kinetic models with incremental or cumulative data suggests that incremental models provide better description of laboratory nitrogen and sulfur mineralization (Ellert and Bettany 1992; Simard et al. 1994) and phosphorus desorption (Beauchemin et al. 1996). For potassium, to our knowledge, only cumulative models have been reported in the literature (Simard et al. 1989; Havlin et al. 1987; Martin and Sparks 1983; Mengel and Uhlenbecker 1993). The objectives of this work were (i) to investigate the K release from four fine clay Abitibi-Temiscamingue soils using the EUF technique, and (ii) to compare some mathematical models (cumulative and incremental) describing the kinetics of K desorption from soils by EUF.

## MATERIALS AND METHODS

### Field Experiments

All details of the field experiments are reported in chapter VI. Briefly, experiments were

conducted from 1994 to 1996 at four sites in the Abitibi-Temiscamingue area, province of Quebec, Canada. Some physical and chemical properties of studied soils are presented in Table 1. Treatments consisted of five rates (0, 50, 100, 150 and 200 kg K ha<sup>-1</sup>) of K applied as muriate of potash and arranged in a completely randomized block design with four replicates. Forage dry matter yield and K uptake were determined as previously reported in chapter VI.

### Laboratory Study: Kinetics of Soil K Release

Soil samples were taken from the 0-15 cm layer in May 1994 and August 1996. The treatments sampled were: K<sub>0i</sub> (control treatment in May 1994); K<sub>0f</sub> (control treatment in August 1996); and K<sub>5f</sub> (200 kg K<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup> treatment in August 1996).

Kinetics of soil K release were investigated using a modified EUF technique with an automatic EUF apparatus (Model 683, Vogel Co., Giessen, Germany). The modification essentially involved K desorption at only 80°C and 400 V. The extracts from the anode and cathode from each fraction were mixed together in volumetric flasks and K concentrations were determined by flame emission spectroscopy. This experiment was replicated three times with a soil water ratio of 4:60. Potassium was extracted successively from soils during 58 min at intervals of 4 min, 4 min, and 5 min thereafter, and <150 mA. Thus, 12 aliquots were obtained. These fractions were referred as K<sub>0-58</sub>.

### Statistical Analyses

Potassium desorbed by EUF was described by five cumulative models (Sparks 1995) and by an incremental first-order model (Ellert and Bettany 1988).

Cumulative models:

$$\text{Elovich equation:} \quad K_d = a + k \ln t \quad [1]$$

$$\text{Parabolic diffusion law:} \quad K_d = a + kt^{1/2} \quad [2]$$

$$\text{Power function:} \quad \ln K_d = \ln a + k \ln t \quad [3]$$

$$\text{Zero-order equation:} \quad (K_d - K_{d'}) = a - kt \quad [4]$$



First-order equation:  $\ln(K_d - K_{dt}) = a - kt$  [5]

where:

$K_d$  = K desorbed after 58 min ( $\text{mg kg}^{-1}$ );

$t$  = time (min);

$K_{dt}$  = K desorbed at time  $t$  ( $\text{mg kg}^{-1}$ );

$a$  = constant ( $\text{mg kg}^{-1} \text{ K}$ );

$k$  = rate constant ( $\text{mg kg}^{-1} \text{ K min}^{-1}$ ).

The constants  $a$  and  $k$  represent the intercept and the slope, respectively. The constant  $k$  indicates the release rate of non-exchangeable K.

The first-order incremental model used is a non-linear function with two independent variables: time and length of interval and was described as follow:

$$K_{di} = K_0 e^{-bt} (e^{bi} - 1) \quad [6]$$

where:

$K_{di}$  = incremental amount of desorbed K ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) during an interval  $i$ ;

$i$  = length of interval proceeding time  $t$  (min);

$t$  = time from the beginning of the desorption process (min);

$K_0$  = the potential amount of K desorbed ( $\text{mg kg}^{-1}$ )

$k$  = first order rate constant ( $\text{min}^{-1}$ )

For all models, the two parameters,  $a$  and  $k$ , were estimated by non linear regression procedures using the DUD option of SAS software (SAS Institute, Inc. 1990). The standard error of the estimate (SE) of the amount of K released for all models was calculated according to the equation (Simard et al. 1992):

$$SE = \left[ \frac{\sum (K_d - K_d^*)}{n - 2} \right]^{1/2}$$

where  $K_d$  and  $K_d^*$  are the measured and calculated concentrations of K released at time  $t$ , respectively, and  $n$  is the number of measurements. All statistical analyses were performed with the SAS software (SAS Institute Inc. 1990).

## RESULTS AND DISCUSSION

### Soil Characteristics

Studied soils (Humic Gleysols) are slightly acidic (Ste-Gertrude) to slightly alkaline (Laverlochère). They have high organic matter contents, particularly at Laverlochere, and the soils from Abitibi (Ste-Gertrude and Palmarolle) have higher clay contents than those from Temiscamingue (Laverlochere and Lorrainville). All soils can be classified as rich in Mehlich 3 extractable K contents in regards to forage needs (Conseil des Productions Végétales du Québec 1994). They also have high extractable Ca and Mg contents (Table 1). According to Simard et al. (1991), the clay mineralogy of these soils is dominated by vermiculite, chloride, and hydrous mica.

### Cumulative K Release

Cumulative K release by EUF after 58 min varied between 199 and 342 mg K kg<sup>-1</sup> depending on sites and treatments (Fig. 1). These amounts are comparable to those extracted by Mehlich 3 and 1 M NH<sub>4</sub>OAc (Table 3 in chapter VI) indicating that most K desorbed by EUF was from exchangeable forms. Potassium application had a significant effect on cumulative K desorbed after 58 min and the contrast  $K_{of}$  vs  $K_{sf}$  was significant (Table 2). Thus, at each site, the total amount of K desorbed was larger in fertilized ( $K_{sf}$ ) than in control treatments ( $K_{of}$  and  $K_{oi}$ ). Cumulative K desorbed varied between 212 and 321 mg K kg<sup>-1</sup> for  $K_{oi}$  and between 275 and 342 mg K kg<sup>-1</sup> for  $K_{sf}$  indicating that K fertilizer increased the desorbable soil K content (Table 2). With  $K_{of}$  treatments cumulative K desorbed varied between 199 and 257 mg K kg<sup>-1</sup> indicating a small K decrease after six forage harvests.

At all sites, more K was desorbed from  $K_{oi}$  than from  $K_{of}$  except at Palmarolle (Fig.1) where more K was extracted with  $K_{of}$  than with  $K_{oi}$  after 58 min. However,

between 0 and 13 min, the same amount of K ( $130 \text{ mg K kg}^{-1}$ ) was desorbed from  $K_{oi}$  and  $K_{of}$  at that site. These results suggest that the Palmarolle soil had initially a large K reserve which may originate from its high clay content as indicated by its large  $\text{HNO}_3$ -K contents (Table 1). At Laverlochere, however, Fig.1 shows that the amount of K desorbed from  $K_{oi}$  was similar to that desorbed from  $K_{sf}$ . This result might be explained by the high initial  $\text{NH}_4\text{OAc-K}$  content of the Laverlochere site compared to the other sites (Table 1) and is in agreement with that presented in chapter VI. Indeed, the highest amount of K extracted at 400 V and  $80^\circ\text{C}$  was obtained at the Laverlochere site in the control treatments and it was comparable to the amount of K extracted in  $K_{sf}$  treatment at the end of the experiment ( $100$  and  $96 \text{ mg K kg}^{-1}$  respectively). It is also possible that dryer soil conditions at the time of sampling in August 1996 compared to May 1994 resulted in a switch of K from the interlayer space to the exchangeable forms (Quemener and Bosc 1992).

### Kinetics of K Release

The desorption data was described using five cumulative and one incremental models. Potassium release from the four soils was initially rapid but its rate decreased with time. More than 50% of the soil K was released between 8 and 13 min (Fig. 1). This type of K release is characteristic of a diffusion-controlled process and is well established in the literature (Feigenbaum et al. 1981; Martin and Sparks 1983). Coefficients of determination ( $R^2$ ) and standard errors (SE) of all tested models are presented in Table 3. Based on the SE and  $R^2$ , all models adequately described the K release. Among cumulative models, K release was better described by the first-order model (Table 3). Selim et al. (1976) developed a mathematical model to describe K reactions and transport in soils and concluded that the reactions between the exchangeable, non-exchangeable, and primary mineral phases were assumed to be of first order. Our results also agree with those of Martin and Sparks (1983) who, working with a  $\text{H}^+$ -saturated resin, found that non-exchangeable K release from two Coastal Plain Ultisols followed first order and parabolic diffusion kinetics. However, among six tested models, Simard et al. (1989) concluded that an extended form of the Elovich equation was the best model fitting the K release from 12 Quebec soils.

When, comparing the results of all cumulative models, the parabolic diffusion equation was found to be less suitable for describing the kinetics of the data as can be seen from the large values of SE despite the high value of  $R^2$  (Table 3). Martin and Sparks (1983) reported that the parabolic diffusion well described non-exchangeable K from sandy loam and loamy sand soils. Others studies also reported that K release kinetics were adequately described by parabolic diffusion (Feigenbaum et al. 1981; Havlin et al.1987). The difference with our results can be partly explained by the difference in soil texture. Our soils have high clay contents (Table 1).

The a and k values of K desorption curves of all tested models are presented in Table 4. This table shows that K application significantly affected these release constants. In general, a and k values of the fertilized treatments ( $K_{sf}$ ) were higher than those of the control for all tested models. The k constant obtained by the different models was decreased after the three growing seasons as shown by the treatment  $K_{of}$  compared to  $K_{oi}$ . However, when the comparison is conducted at each site individually, a larger b value was observed at the end of the experiment at Palmarolle. This result is obtained for all models indicating that this site has greater K reserve than the other sites as suggested by its higher  $HNO_3$ -K content (Table 1). This result is also consistent with that previously reported in chapter VI.

The amount of incremental K release vs time at each site as predicted by the first order incremental model is presented in Fig. 2. Between 85 and 97% of the variation of K desorbed was explained by this model which is better than the cumulative models tested in describing the release data. The major advantage of the incremental model is the reduction of the interdependence of observation errors that arises with cumulative models (Ellert and Bettany 1988, 1992). Beauchemin et al. (1996) successfully used an incremental model to describe phosphorus desorption from a podzolic soil. To our knowledge it is the first time that the first-order incremental model is used to describe the kinetics of K desorption from soils.

### Potassium Release Models and Grass K Uptake

Results presented previously in chapter VI show that K fertilizer had a significant effect on cumulative forage K uptake. Cumulative K uptake varied between 278 and 371 kg K ha<sup>-1</sup> in the control treatments and between 348 and 517 kg K ha<sup>-1</sup> when 200 kg ha<sup>-1</sup> of K was applied (Table 3; chapter VI). The relatively high cumulative K uptake from the control treatments can be explained by the high clay content of studied soils. Simard et al. (1990) reported that K uptake by alfalfa (*Medicago sativa* L.) was related to the soil texture and only soils with clay contents greater than 35% were still able to supply enough K to maintain alfalfa yields after ten successive cuts. Clay contents of studied soils varied between 70 and 86%. Mengel (1985) has extensively reviewed the literature on plant uptake of non-exchangeable K and indicated that monocots are very effective in uptake of K from this soil K pool. It is therefore not surprising that the clay soils studied were able to provide enough K from their reserves.

Potassium uptake by forage was correlated with the k values of all tested models, in particular, from the first-order model (incremental and cumulative; Table 5). About 57% of the variation of cumulative K uptake was explained by the incremental first order k constant. This suggested that the incremental model was the best among investigated models in predicting the forage K uptake. At Palmarolle site in particular, the best correlation between K uptake and k was obtained with this model (Table 5). These results show that the k constant, adequately described the plant K uptake. Havlin and Westfall (1985) found that the release rate constant of the power function equation was also significantly related to K uptake by alfalfa (*Medicago sativa* L.). In a recent study conducted in South Western Spain, Pineiro and Navarro (1997) found that the release rate constant of the Elovich equation was closely associated with K uptake by Colonial bentgrass (*Agrostis tenuis* L.).

For the cumulative models, the first-order equation proved to be the best model describing the relationship between the k value and the K uptake by forage. About 56% of the variation of K uptake was explained by this model and results are comparable to the first order incremental model tested in the present study. However, based on the advantages of incremental model cited earlier (Ellert and Bettany 1988, 1992) over

cumulative models, the incremental first order model would be preferable to describe the kinetics of K release from these soils.

### SUMMARY

Based on the kinetics study using Abitibi-Temiscamingue soils, the following conclusions can be drawn:

1. K release from the four studied soils were initially rapid followed by a much slower release rate;
2. K release was lower in control soils than in soils that had received 200 kg K<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup> for three cropping seasons;
3. Among the five cumulative kinetic models used to describe the K release, the first-order equation best described the observed data;
4. About 57 % of the variation of forage K uptake was explained by the incremental first order k constant. Thus, based on advantages of incremental models over cumulative models, the first-order incremental model showed preferably be used to describe cumulative forage K uptake from soils.

## REFERENCES

- Al-Kanani, T., MacKenzie, A. F. and Ross, G. J. 1984.** Potassium status of some Québec soils: K released by nitric acid and sodium tetraphenylboron as related to particle size and mineralogy. *Can. J. Soil Sci.* **64**: 99-107.
- Beauchemin, S., Simard, R. R. and Cluis, D. 1996.** Phosphorus sorption-desorption kinetics of soil under contrasting land uses. *J. Environ. Qual.* **25**: 1317-1325.
- Ellert, B. H. and Bettany, J. R. 1988.** Comparison of kinetics models for describing net sulfur and nitrogen mineralization. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **52**: 1692-1702.
- Ellert, B. H. and Bettany, J. R. 1992.** Temperature dependence of net nitrogen and sulfur mineralization. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **56**: 1133-1141.
- Feigenbaum, S., Edelstein, R. and Shainberg, I. 1981.** Release rate of potassium and structural cations from micas to ion exchangers in dilute solutions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **43**: 501-506.
- Havlin, J. L., and Westfall, D. G. 1985.** Potassium release kinetics and plant response in calcareous soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **49**: 366-370.
- Havlin, J. L., and Westfall, D. G. and Olsen, S. R. 1985.** Potassium release kinetics and plant response in calcareous soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **49**: 371-376.
- Hemlke, P. A. and Sparks, D. L. 1996.** Lithium, Sodium, Potassium, Rubidium, and Cesium. Pages: 551-574. *in* D. L. Sparks ed. *Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical methods.* SSSA, SSSA and ASA. Madisson, Wi. USA.
- Lanyon, L.E. and Smith, F.W. 1985.** Potassium nutrition of alfalfa and other forage legumes: temperate and tropical. pp: 861-893 *in* R. D. Munson ed. *Potassium in agriculture.* ASA, Madisson, WI.
- Martin, H. W., and D. L. Sparks. 1983.** Kinetics of nonexchangeable potassium release from two Coastal plain soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **47**: 883-887.
- Mengel, K., and Uhlenbecker, K. 1993.** Determination of available interlayer potassium and its uptake by ryegrass. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **47**: 883-887.

- Nemeth, K. 1979.** The availability of nutrients in the soil as determined by electro-ultrafiltration (EUF). *Advances in Agronomy* **31**:155-188.
- Nemeth, K. 1985.** Recent advances in EUF research (1980-1983). *Plant and Soil* **83**: 1-19.
- Pineiro, L. A. and Navarro, C. A. 1997.** Potassium release kinetics and availability in unfertilized vertisols of southwestern Spain. *Soil Sci.* **162**:912-918.
- Quemener, J., and Bosk, M. 1992.** Remarques sur la détermination du potassium échangeable. Pages109-132. *in* L. Gachoned ed. Phosphore et potassium dans les relations sol-plantes: conséquences sur la fertilisation, INRA, Paris, France.
- SAS Institute Inc. 1990.** SAS/STAT user's guide, Version 6, ed. SAS Institute Inc., Cary, NC.
- Selim, H. M., Mansell, R. S., and Zelazny, L. W. 1976.** Modeling reactions and transport of potassium in soils. *Soil Sci.* **122**: 77-84.
- Simard, R. R. Angers, D. A., and Lapierre, C. 1994.** Soil organic matter quality as influenced by tillage, lime and phosphorus. *Biol. Fertil. Soils* **18**: 13-18.
- Simard, R. R., Zizka, J. and DeKimpe, C. R. 1990.** Le prélèvement du K par la luzerne (*Medicago sativa* L.) et sa dynamique Dans 30 sols du Québec. *Can. J. Soil Sci.* **70**: 379-393.
- Simard, R. R., C. R. DeKimpe and J. Zizka. 1992.** Release of potassium and magnesium from soil fractions and its kinetics. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **56**: 1421-1428.
- Simard, R. R., Tran, T. S. and Zizka, J. 1991.** Evaluation of the electro-ultrafiltration technique (EUF) as a measure of the supplying power of Quebec soils. *Plant and Soil* **132**: 91-101.
- Simard, R. R., Zizka, J. and DeKimpe, C. R. 1989.** The kinetics of non-exchangeable potassium and magnesium release from Québec Soils. *Can. J. Soil Sci.* **69**: 663-675.
- Sparks, D. L. 1995.** Environmental soil chemistry. Academic Press, Inc. , San, Diego, CA. 267p.
- Tran, T. S., Tabi, M. and DeKimpe, C. R. 1987.** Relation du potassium extrait par EUF et quelques méthodes chimiques avec les propriétés du sol et le rendement des plantes. *Can. J. Soil Sci.* **67**: 17-31.



## LIST OF FIGURES

**Fig. 1.** Cumulative EUF-K released at 400 V and 80°C vs. time (58 min) for the studied soils: (a) Ste-Gertrude, (b) Palmarolle, (c) Laverlochere, and (d) Lorrainville.

**Fig. 2.** Amount of incremental K released at 400 V and 80°C vs. time (58 min) as predicted by the first order incremental model for the studied soils: (a) Ste-Gertrude, (b) Palmarolle, (c) Laverlochere, and (d) Lorrainville .

Table 1: Chemical and physical properties of the studied soils

site	Ste-Gertrude	Palmarolle	Laverlochere	Lorrainville
pH (eau)	5.9c	6.0bc	7.2a	6.3b
O.M <sup>z</sup> (g kg <sup>-1</sup> )	45.0bc	62.0b	118.0a	52.0bc
CEC <sup>y</sup> (cmol (+) kg <sup>-1</sup> )	36.82b	41.14a	35.0a	24.4c
<b>Particle size distribution (g kg<sup>-1</sup>)</b>				
Clay	860a	850a	700b	700b
Sand	18b	26a	15b	28a
Silt	122b	124b	285a	272a
<b>Mehlich 3 (mg kg<sup>-1</sup>)</b>				
K	180b	190b	232a	135c
Ca	2604b	2859b	5609a	2250c
Mg	518a	535a	520a	367b
<b>NH<sub>4</sub>OAc (mg kg<sup>-1</sup>)</b>				
K	193b	168c	189b	244a
Ca	2629c	3918b	5926a	1976d
Mg	538a	524a	508b	366c
<b>HNO<sub>3</sub> (mg kg<sup>-1</sup>)</b>				
K	1320c	2362a	1707b	1839b
Ca	3200c	5108b	9475a	3071c
Mg	5773c	8566a	5290c	6248b

<sup>z</sup>O.M = Organic matter

<sup>y</sup>CEC = Cation exchange capacity

Within a same line, means followed by the same letter are not statistically different at P = 0.05 according to the least significant difference test.

Table 2. Effect of K fertilizer (Mean square values) on K extracted at 400 V and 80°C ( $K_{0-58}$ ) and cumulative K uptake by grasses

Source of Variation	df	$K_{0-58}$	cumulative K uptake
Treatments (T)	2	29.37***	22.85***
Replicates	2	0.09	1.93
Sites (S)	3	5.92	38.06***
T* S	6	3.59	0.37
<b>Contrasts</b>			
$K_{0i}$ vs. $K_{0r}$	1	3.71	-
$K_{0i}$ vs. $K_{5r}$	1	54.58***	34.28***

\*\*\* Significant at  $P=0.001$

Table 3. Coefficient of determination ( $R^2$ ) and standard error of the estimate (SE) of various kinetic models for total K release in the studied soils

Models	Treatment	Ste-Gertrude		Palmarolle		Laverlochere		Lorraineville	
		$R^2$	SE	$R^2$	SE	$R^2$	SE	$R^2$	SE
Elovich	$K_{0i}$	0.74	22.15	0.78	24.88	0.75	32.88	0.69	22.88
	$K_{0r}$	0.72	23.20	0.54	57.08	0.92	12.64	0.28	46.69
	$K_{sr}$	0.46	63.37	0.72	28.62	0.59	47.48	0.96	10.12
Parabolic diffusion	$K_{0i}$	0.72	22.83	0.77	25.57	0.71	34.97	0.66	24.04
	$K_{0r}$	0.72	97.72	0.54	57.01	0.87	16.03	0.27	46.91
	$K_{sr}$	0.44	64.44	0.70	29.86	0.56	49.28	0.93	13.95
First-order	$K_{0i}$	0.90	0.30	0.91	0.27	0.97	0.18	0.92	0.27
	$K_{0r}$	0.92	0.25	0.91	0.30	0.97	0.18	0.96	0.19
	$K_{sr}$	0.94	0.23	0.89	0.34	0.96	0.23	0.97	0.19
Power function	$K_{0i}$	0.81	0.12	0.84	0.14	0.77	0.14	0.76	0.12
	$K_{0r}$	0.79	0.15	0.67	0.30	0.91	0.09	0.33	0.30
	$K_{sr}$	0.56	0.24	0.74	0.14	0.68	0.16	0.95	0.05
Zero-order	$K_{0i}$	0.83	16.35	0.85	18.66	0.86	21.61	0.79	16.80
	$K_{0r}$	0.88	13.59	0.81	28.60	0.85	16.98	0.87	10.58
	$K_{sr}$	0.83	24.43	0.84	19.22	0.81	25.84	0.87	17.59
Incremental model	$K_{0i}$	0.88	13.65	0.91	14.46	0.97	10.47	0.88	12.73
	$K_{0r}$	0.91	11.42	0.85	25.30	0.97	7.44	0.94	7.30
	$K_{sr}$	0.92	16.86	0.91	14.01	0.93	15.88	0.97	8.61

Table 4. Intercept and slope (a and k) values for the tested models describing K release in studied soils

Models	Treatments	Ste-Gertrude		Palmarolle		Laverlochere		Lorrainville	
		a	k	a	k	a	k	a	k
Elovich	K <sub>0f</sub>	21.04	46.13	-14.15	57.93	40.36	69.74	42.92	42.62
	K <sub>0f</sub>	5.63	46.00	-56.51	75.76	13.65	53.31	45.04	36.04
	K <sub>5f</sub>	31.51	72.04	42.84	56.77	60.03	70.38	62.30	62.29
Parabolic diffusion	K <sub>0f</sub>	58.42	20.82	32.38	26.23	98.81	31.11	78.71	19.00
	K <sub>0f</sub>	42.11	20.92	2.07	34.61	58.82	23.69	74.33	16.25
	K <sub>5f</sub>	91.49	32.21	89.72	25.46	119.80	31.25	113.87	27.91
First-order	K <sub>0f</sub>	5.08	0.06	5.29	0.05	5.51	0.06	4.96	0.06
	K <sub>0f</sub>	5.09	0.05	5.64	0.06	5.24	0.06	4.84	0.06
	K <sub>5f</sub>	5.53	0.06	5.30	0.06	5.51	0.06	5.42	0.06
Power function	K <sub>0f</sub>	58.70	0.32	43.00	0.41	93.66	0.31	72.86	0.27
	K <sub>0f</sub>	46.90	0.35	29.64	0.54	57.51	0.35	64.73	0.25
	K <sub>5f</sub>	86.22	0.33	83.70	0.29	110.43	0.28	106.56	0.27
Zero-Order	K <sub>0f</sub>	106.26	2.02	134.37	2.55	150.78	2.98	93.67	1.82
	K <sub>0f</sub>	109.24	2.04	176.50	3.39	113.72	2.26	82.14	1.58
	K <sub>5f</sub>	159.43	3.10	127.44	2.46	149.71	2.99	137.29	2.69
Incremental first-order model	K <sub>0f</sub>	540.04	0.06	687.64	0.06	707.72	0.07	449.12	0.07
	K <sub>0f</sub>	575.57	0.06	903.01	0.06	525.02	0.08	411.84	0.06
	K <sub>5f</sub>	769.54	0.07	627.01	0.07	688.63	0.08	660.10	0.07

Table5. Correlation coefficient for cumulative K uptake vs. a and k values of the various models tested

MODELS	Ste-Gertrude		Palmarolle		Laverlochere		Lorrainville	
	a	k	a	k	a	k	a	k
<b>Cumulatif</b>								
Elovich	0.614***	0.762***	0.577***	0.348***	0.469***	0.303***	0.934***	0.911***
Parabolic diffusion	0.721***	0.762***	0.599***	0.359***	0.438***	0.294**	0.934***	0.914***
first order	0.762***	0.66***	0.307***	0.318***	0.286**	0.496***	0.923***	0.861***
power function	0.729***	0.144NS	0.619***	0.544***	0.426***	0.471***	0.923***	0.469***
Zero-Order	0.761***	0.762***	0.388**	0.367***	0.274**	0.287**	0.92***	0.917***
<b>Incremental</b>								
First-order	0.754***	0.735***	0.427***	0.632***	0.238**	0.397***	0.929***	0.225**

\*\*\*, \*\* significant at  $P < 0.001$  and  $P < 0.01$

NS not significant

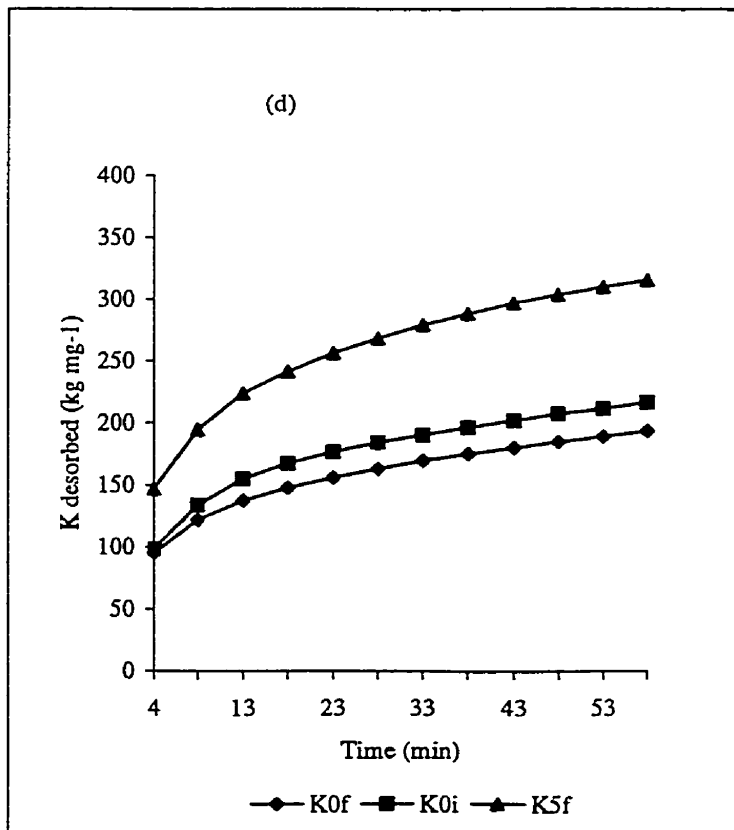
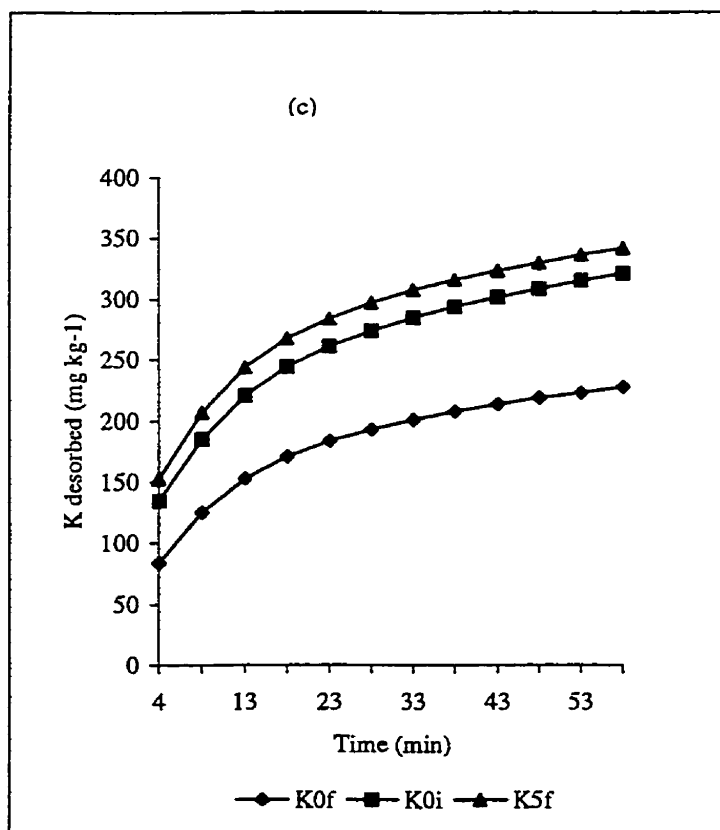
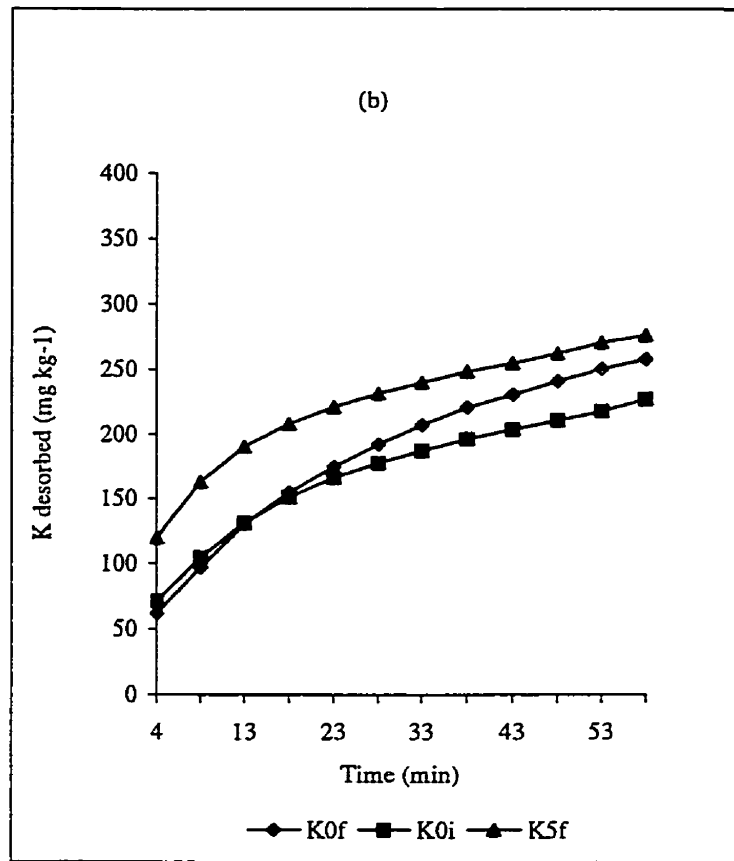
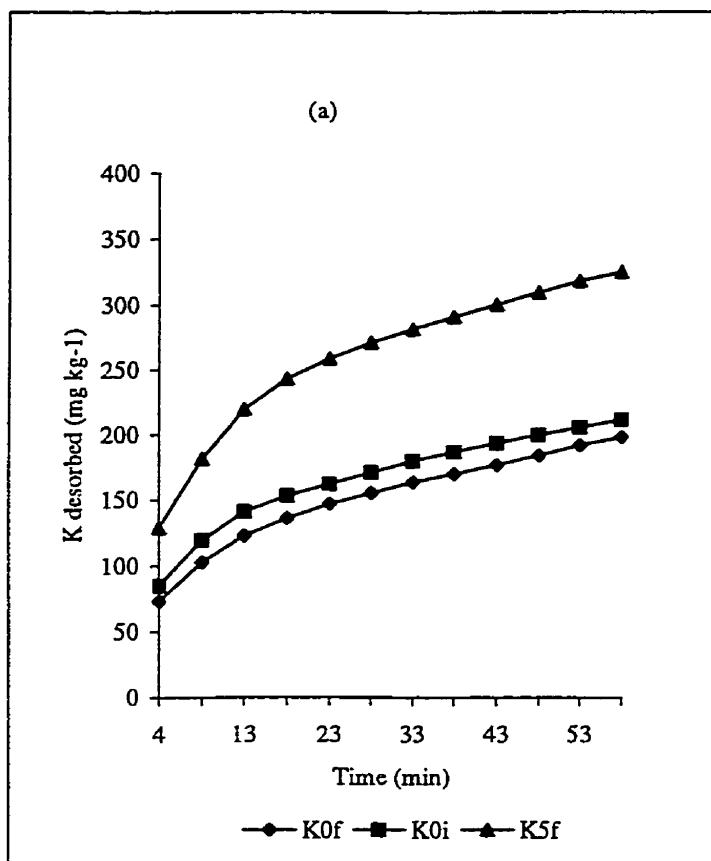


Figure 1

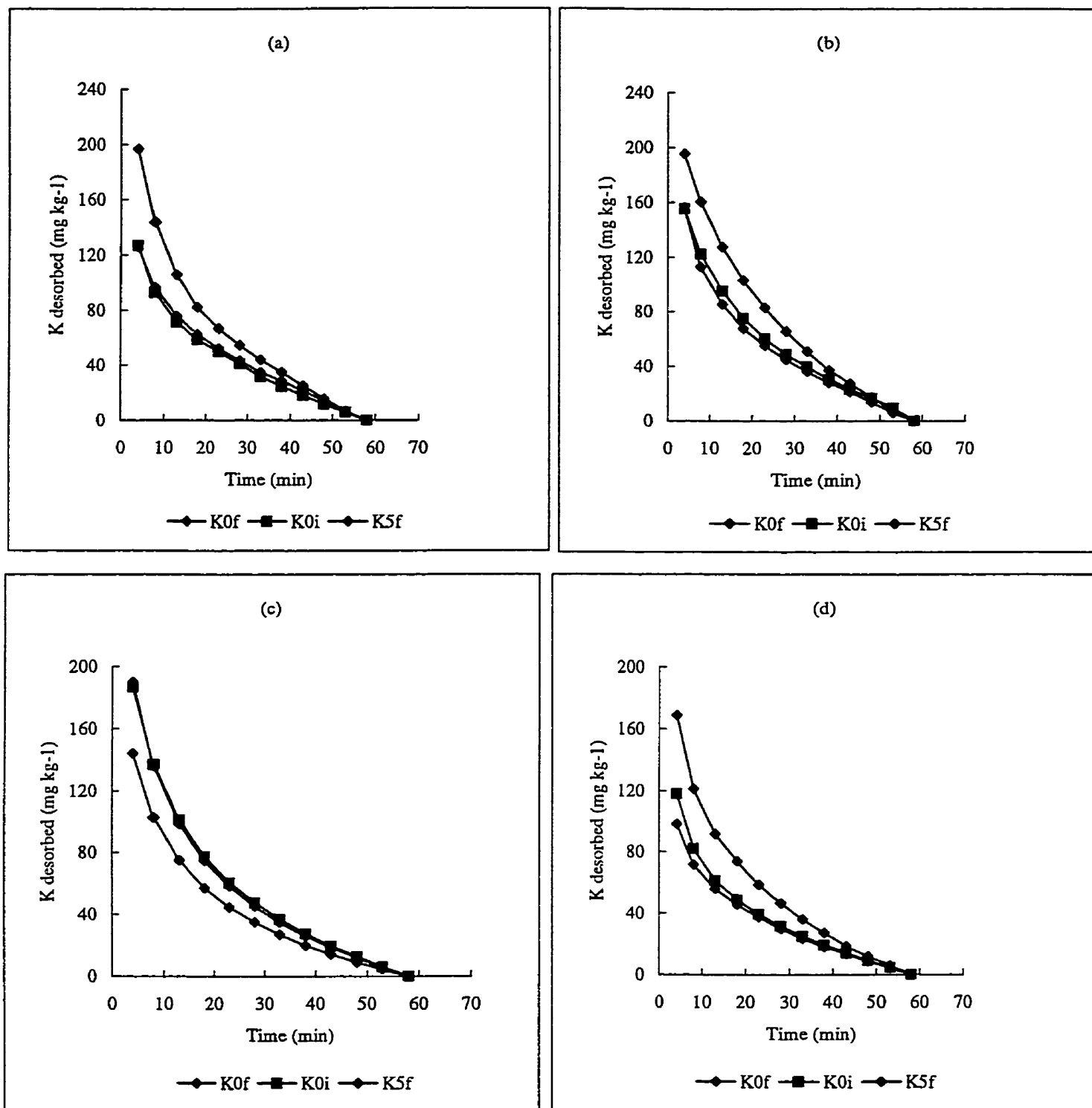


Figure 2



## **CHAPITRE VIII**

### **CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS**

Environ 43% des superficies défrichées en Abitibi-Témiscamingue sont consacrées à des espèces fourragères, plus particulièrement, à la fléole des prés. Des apports en engrais minéraux notamment, l'azote, le phosphore et le potassium, sont effectués annuellement afin de combler les besoins nutritifs de ces cultures. Par ailleurs, il est important de maximiser l'efficacité de ces engrais afin d'augmenter les profits et de diminuer les risques de pollution environnementale. Les sols de l'Abitibi-Témiscamingue, 50 à 80% argileux, n'ont pas été étudiés lors de la calibration des besoins en engrais minéraux des cultures au Québec. Cette région se caractérise par un climat continental différent du sud de la province où la calibration a été effectuée. Il était donc important d'évaluer avec plus de précision les besoins des plantes fourragères en éléments nutritifs.

Les objectifs de la présente étude étaient (i) quantifier l'effet de la fertilisation N, P et K sur le rendement et la qualité des graminées fourragères produites en Abitibi-Témiscamingue, (ii) comparer quelques méthodes d'analyse du sol afin de mieux prédire la disponibilité de chacun de ces éléments aux fourrages et (iii) étudier la cinétique de désorption de P et de K par la technique d'Électro-ultrafiltration. Les hypothèses émises par l'étude ont été vérifiées et les objectifs ont été atteints. Ainsi, les conclusions suivantes ont été formulées:

1. La fertilisation azotée a eu un effet positif sur le rendement des fourrages produits en Abitibi-Témiscamingue. Le rendement annuel des fourrages a ainsi doublé par rapport au témoin non fertilisé suite à l'apport de  $240 \text{ kg N ha}^{-1}\text{an}^{-1}$  pour atteindre  $5 \text{ Mg ha}^{-1}$ . La qualité de ces fourrages ainsi que la teneur du sol en nitrates n'ont pas été négativement affectées par cet apport. Les quantités élevées de N, nécessaires à l'atteinte d'un rendement économique optimum, sont en partie expliquées par la faible minéralisation de N du sol au début du printemps résultant elle même des conditions climatiques fraîches de la région d'étude. Ces résultats, obtenus pour la première fois dans la région, confirment ceux des autres travaux de recherche rapportés dans la littérature indiquant

que la minéralisation de N est fortement influencée par les conditions climatiques, notamment la température. Il faudra tenir compte de cette réalité dans les stratégies de fertilisation des fourrages dans cette région. Ainsi, une plus grande partie de l'azote recommandée devrait être appliquée au printemps avant ou au début de la première pousse. La proportion relative à respecter entre les deux coupes devrait être précisée par des travaux ultérieurs.

2. L'utilisation des résines sous forme de membranes d'échanges anioniques (AEMs) est une méthode prometteuse et efficace pour prédire la disponibilité de l'azote sous forme de nitrate ( $\text{NO}_{3\text{AEMs}}$ ) pour les fourrages à base de graminées produits en Abitibi-Témiscamingue. Ainsi, au cours des deux saisons végétatives, les AEMs nous ont permis à la fois de déterminer l'effet de l'engrais minéral appliqué sous forme d'azote et d'estimer grossièrement la minéralisation de l'azote du sol, ce qui n'est pas le cas avec l'extraction à l'eau utilisée comme méthode de référence d'analyse du sol. Les avantages que possèdent ces résines par rapport aux extractifs chimiques sont à l'origine de ces résultats. En effet, la quantité de nitrates adsorbés à la résine est fonction de i) la concentration de la solution du sol en ces ions, ii) de la capacité du sol à renouveler sa solution en ces mêmes ions et iii) de la diffusion de ceux-ci. Une estimation plus complète de la disponibilité des nitrates est ainsi obtenue par cette technique. À notre connaissance, ces résultats sont les premiers à être rapportés dans la littérature sous des conditions de champ. L'utilisation des AEMs pour le dosage des éléments dans le sol est récente et a surtout concerné le phosphore. De plus, l'étude économique effectuée a révélé que, comparé au nitrate extrait à l'eau ( $\text{NO}_{3\text{w}}$ ), le flux de  $\text{NO}_{3\text{AEMs}}$  du sol constitue un meilleur indice de la disponibilité du N du sol pour les cultures fourragères produits en Abitibi-Témiscamingue et permet ainsi de mieux prédire les besoins en engrais azotés des fourrages dans cette région. Ces résultats sont en partie expliqués par la relation significative entre le rendement relatif et la teneur du sol en nitrates au printemps dosés avec les résines. Cette relation n'est pas significative dans le cas des nitrates extraits à l'eau.
3. L'apport de l'engrais phosphaté n'a eu d'effet significatif sur le rendement des fourrages produits en Abitibi-Témiscamingue qu'à la troisième année de l'expérimentation bien

que les analyses de sol effectuées avant le début de l'expérience révèlent que ces sols variaient de pauvres à moyens en P selon les recommandations présentement en usage au Québec (CPVQ 1996). Ces résultats obtenus au champ laissent croire que les sols de la région de l'Abitibi-Témiscamingue ont des réserves importantes en P sous forme rapidement et lentement labile pouvant répondre aux besoins des plantes et que la calibration des besoins en engrais phosphatés à partir des résultats d'analyse de sol par les méthodes présentement utilisées n'est probablement pas adaptée à ces sols. Par ailleurs, les études complémentaires effectuées en laboratoire en utilisant la technique d'Électro-ultrafiltration (EUF) ont révélé que le manque de réponse des fourrages à l'engrais phosphaté est attribué aux réserves élevées en P des sols étudiés. Des degrés de linéarité élevés ( $0,97 < R^2 < 0,99$ ) entre le P désorbé du sol à 200 V et 20°C par EUF et le temps ont été obtenus. Ces cinétiques proches de celles d'ordre zéro, suggèrent que la libération de P n'était pas limitée par la taille des réserves. Ces résultats indiquent que les sols étudiés ont une forte capacité de fournir le P à la solution du sol à partir du P en réserve.

Ce P devient disponible aux plantes à plus au moins long terme selon la demande. La facilité des sols à remplacer le P prélevé peut expliquer le manque de réponse des plantes aux engrais minéraux phosphatés durant les deux premières années de l'expérience. Les méthodes chimiques utilisées en laboratoire pour doser le P ont démontré l'efficacité des AEMs pour prédire la disponibilité du P du sol aux fourrages produits dans la région d'étude. Nos résultats relatifs à la fertilisation phosphatée, obtenus pour la première fois *in situ*, confirment d'autres travaux de recherche effectués (Tran et al. 1992; Simard et Tran 1993) avec les mêmes types de sol en conditions contrôlées indiquant que les sols de la région de l'Abitibi-Témiscamingue ont des réserves élevées en P.

4. La fertilisation potassique n'a pas eu d'effet significatif sur le rendement des fourrages durant les trois années d'expérimentation malgré que les analyses de sol effectuées au début de l'expérience révélaient que ces sols variaient de moyens à riches en K selon les recommandations en usage au Québec (CPVQ 1996). Ces résultats obtenus au champ laissent croire que les sols de la région de l'Abitibi-

Témiscamingue ont des réserves importantes en K pouvant répondre aux besoins des plantes à court et à moyen terme et que la calibration des besoins en engrais potassiques à partir des résultats d'analyses de sol via les méthodes statiques utilisées n'est probablement pas adaptée à ces sols. Par ailleurs, l'étude de la cinétique de désorption de K effectuée à l'aide de la technique d'EUF a révélé que le manque de réponse des fourrages à l'engrais potassique est attribué aux réserves importantes en K des sols étudiés. Des degrés de linéarité assez élevés ( $0,94 < R^2 < 0,98$ ) entre le K désorbé avec EUF à 200 V et 20°C et le temps ont été obtenus. Les résultats indiquent que les sols étudiés ont une forte capacité de fournir du K à partir des formes lentement échangeables à la solution du sol d'où il sera prélevé par les plantes. De plus, la cinétique de désorption de K des quatre sols étudiés en utilisant la technique d'EUF a été adéquatement décrite par cinq modèles cumulatifs et un modèle incrémentiel de premier ordre. À notre connaissance, c'est la première fois qu'une étude de cinétique du K a été effectuée en utilisant un modèle incrémentiel. Par ailleurs, ces résultats obtenus pour la première fois *in situ*, confirment d'autres travaux (Simard et al. 1989; Simard et al. 1990) effectués en conditions contrôlés avec la luzerne indiquant la richesse naturelle des sols de la région de l'Abitibi-Témiscamingue en K.

Au terme de cette étude, les recommandations suivantes ont été formulées:

1. La supériorité de l'utilisation des AEMs a été démontrée par rapport aux extractifs chimiques en ce qui concerne la prédiction de la disponibilité des nitrates aux plantes fourragères. Il est fortement recommandé de poursuivre la recherche sur la possibilité d'utiliser les AEMs sous d'autres conditions et avec d'autres espèces végétales. Les conditions pédoclimatiques spécifiques de la région de l'Abitibi-Témiscamingue pourraient avoir un impact sur l'évaluation de cette nouvelle méthode. Des essais complémentaires, notamment sous des conditions contrôlées, afin de déterminer avec plus de précision notamment la durée 'idéale' de contact des AEMs avec le sol donnant une meilleure estimation de la disponibilité des nitrates ou autres ions s'avèrent également nécessaires. Les différentes périodes testées par la présente étude ont varié de 13 à 240 jours et ont été planifiées avec les autres opérations effectuées

au champ. L'éloignement de nos sites expérimentaux était un facteur limitant pour l'étude de cet aspect.

2. L'utilisation de membranes d'échanges cationiques et de membranes d'échanges anioniques pour estimer simultanément la disponibilité de deux formes d'azote dans le sol à savoir, l'ammonium et les nitrates, pourrait être intéressante. Il est bien connu que les nitrates constituent la forme de N la plus présente dans le sol. Cependant, l'ammonium constitue une autre source d'azote pour les plantes si les conditions de nitrification ne sont pas favorables. Cette situation est souvent caractéristique des conditions fraîches au printemps où l'hydromorphie domine suite à l'apport en eau nivéal. Ainsi, l'évaluation de ces deux formes représente une estimation plus complète. La mesure de l'ammonium soluble du sol n'a pas été effectuée dans la présente étude parce que la nitrification est rapide sous les conditions climatiques de l'Abitibi-Témiscamingue et les fourrages préfèrent les nitrates. De plus, l'objectif principal était la mise au point d'une méthode efficace pour le dosage des nitrates.
  
3. La présente étude a révélé que les AEMs utilisés au champ constituent un outil très intéressant pour estimer la disponibilité des nitrates pour les plantes fourragères. De plus, il a été démontré que ces résines utilisées seulement en laboratoire sont plus efficaces que les autres méthodes testées (EUF et extractifs chimiques) vis-à-vis la disponibilité du phosphore pour les plantes. Il est donc recommandé d'évaluer ces résines au champ. Les résultats obtenus seront sans doute intéressants et complémentaires à d'autres travaux de recherche effectués ailleurs (Qian et al. 1992; Cooperband et Logan 1994). Les résultats de la présente étude suggèrent fortement que la grille de fertilisation en P des fourrages doit être modifiée pour traduire la réalité des sols argileux de l'Abitibi-Témiscamingue comme c'est également le cas pour les recommandations en fertilisation N et K.

4. Une étude exhaustive de la cinétique de désorption de P par EUF ou autres méthodes appropriées afin de compléter les informations actuellement disponibles sur la capacité des sols de la région de l'Abitibi-Témiscaminque à fournir le P aux plantes serait intéressante. Ceci pourrait être accompli en établissant une relation entre le prélèvement du P par les fourrages, d'une part et le taux de libération de P du sol via des modèles mathématiques et la fraction disponible du P (exemple: P extrait à l'eau ou au Mehlich 3), d'autre part.

Parmi les résultats les plus importants à retenir de cette étude, on peut surtout mentionner l'efficacité des membranes d'échanges anioniques à évaluer la disponibilité de l'azote sous forme de nitrates aux plantes fourragères. Cette méthode d'analyse de sol peut facilement être adaptée à d'autres éléments (sous formes d'anions ou de cations) entre autres le phosphore et le potassium.

**RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

**Amer, F., Boulin, D. R., Black, C. A. et Duke, F. R. 1955.** Characterization of soil phosphorus by anion exchange resin adsorption and P32-equilibration. *Plant Soil* **6**: 391-408.

**Anonyme. 1974. National Atlas of Canada.** 4<sup>th</sup> ed. Dept. of Energy, Mines and Ressources, Ottawa. Ontario.

**Association of official analytical chemists. 1980.** Official methods of analysis. 13<sup>th</sup> ed. AOAC, Washington, D.C.

**Barber, S. A. 1995.** Soil nutrient bioavailability: a Mechanistic Approach. John Wiley & Sons, N.Y. 398 p.

**Barnett, G., Martel, Y. et Zizka, J. 1977.** Calibration des analyses de sol en regard des cultures avoine, foin, féverole et colza: Projet de calibration des analyses de sol de la section de calibration. Commission des sols, CPVQ. 75 pp.

**Bélanger, G. et Richards, J. E. 1997.** Growth analysis of timothy grown with varying N nutrition. *Can. J. Plant Sci.* **77**: 373-380.

**Bélanger, G., Richards, J. E. et Walton, R. B. 1989.** Effects of 25 years of N, P and K fertilization on yield, persistence and nutritive value of a timothy sward. *Can. J. Plant Sci.* **69**: 501-512.

**Below, F. E. 1995.** Nitrogen Metabolism and crop productivity. Page 274-301 *In* Pessarali, M. ed. Handbook of plant and crop physiology. N. Y.

**Bremner, J. M. et Mulvaney, C. S. 1982.** Nitrogen-total. Pages 595-624. *in* A. L. Page, R. H. Miller, and D. R. Keeney, eds. Methods of soil analysis. Part.2. Chemical and microbiological properties. Agron. **9**. ASA-SSSA. Madison. WI. USA.



**Bundy, L. G. et Meisinger, J. J. 1994.** Nitrogen availability indices. Pages 951-978 in S. H, Mickelson, ed. Methods of soil analysis. Part 2. Microbiological and biochemical properties. SSSA. Madison, WI.

**Cataldo, D. A., Haroon, M., Schrader, L. E., et Youngs, V. L. 1975.** Rapid colorimetric determination of nitrate in plant tissue by titration of sicylic acid. Commun. Soil Sci. Plant Ana. 6: 71-80.

**Conseil des Productions Végétales du Québec. 1993.** Grilles de Références en Fertilisation. Agdex 540. Gouvernement du Québec, Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation. 128pp.

**Corey, R. B. et Schulte, E. E. 1973.** Factors affecting the availability of nutrients to plants. Pages:23-33. Dans Walsh, L. M. et Beaton, J. D. Soil testing and plant analysis. SSSA, Madison, WI.

**Cooperband, L. R. et Logan, T. J. 1994.** Measuring *in situ* changes in labile soil phosphorus with anion- exchange membranes. Soil Sci. Soc. Am. J. 58: 105-114.

**Dionne, J. L., Pesant, A. R. et Barnett, G. M. 1987.** Effets de la fumure potassique et des régimes hydriques sur la réponse au potassium de la luzerne et de la fléole des prés. Can. J. Soil Sci. 67: 811-823.

**Dobermann, A., Pampolino, M. F. et Adviento, M. A. A. 1997.** Resin capsules for on-site assessment of soil nutrient supply in lowland rice fields. Soil Sci. Soc. Am. J. 61: 1202-1213.

**Dubé, P. A., Chevrette, J. E. et Lamb, E. 1982.** Agrométéorologie. Agdex 070. Atlas Agroclimatique du Québec Méridional. Données Dérivées de la température. Gouvernement du Québec, MAPAQ.

**FAO, 1995.** Annuaire d'engrais 1994. Collection FAO. Statistiques no 126. FAO, Rome.

**Gibson, D. J. 1986.** Spatial and temporal heterogeneity in soil nutrient supply measured using *in situ* ion-exchange resin bags. Plant and Soil. 96: 445-450.

**Grant, E. A. et Maclean, A. A. 1966.** Effect of nitrogen, phosphorus and potassium on yields, persistence, and nutrient content of timothy. *Can. J. Plant Sci.* **61**: 68-70.

**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.

**Guertin, S. P., St-Pierre, J. C. et Gervais, P. 1979.** Influence de la fertilisation azotée sur le rendement, la valeur nutritive et la teneur en diverses fractions azotées de trois cultivars de la fléole des prés. *Can. J. Plant Sci.* **59**: 839-846.

**Hartz, T. K. 1994.** A quick test procedure for soil nitrate-nitrogen. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* **25(5&6)**: 511-515.

**Hendershot, W. H., Lalande, H. et Duquette, M. 1993.** Ion exchange and exchangeable cations. Pages 167-176. *in* M. R. Carter, ed. Soil sampling and methods of analysis. Canadian Society of Soil Science. Lewis Publishers, Boca Raton, FL.

**Hunt, I. V., Frame, J. et Harkess, R. D. 1979.** The effect of date of primary growth harvest and levels of nitrogen and potassium fertilizers on the dry matter production of timothy (*Phleum pratense* L.). *Grass Forage Sci.* **34**: 131-137.

**Isaac, R. A et Kerber, J. D. 1971.** Atomic absorption and flame photometry: Technique and uses in soil, plant and water analysis. Pages:17-28 *Dans* L. M. Walsh ed.. Instrumental methods for analysis of soils and plant tissue. ASA, Madison, WI.

**Jowkin, V. et Schoenau, J. J. 1998.** Impact of tillage and landscape position on nitrogen availability and yield of spring wheat in the Brown soil zone in southwestern Saskatchewan. *Can. J. Soil Sci.* **78**: 563-572.

**Keeney, D. R. et Nelson, D. W. 1982.** Nitrogen-inorganic forms. Pages:643-698. *Dans* A. L. Page, Miller, R. H. et Keeney, D. R. ed. Methods of soil analysis, Part. 2. Agronomy monograph no 9. ASA-SSSA. Madison, WI.

**Kline, P. et Broersma, K. 1983.** The yield, nitrogen and nitrate content of reed canarygrass, meadow foxtail and timothy fertilized with nitrogen. *Can. J. Plant Sci.* **63**: 943-950.

**Koerselman, W. et Meuleman, A. F. 1996.** The vegetation N:P ratio: a new tool to detect the nature of nutrient limitation. *Journal of Applied Ecology*. **33**: 1441-1450.

**Lanyon, L. E. et Smith, F.W. 1985.** Potassium nutrition of alfalfa and other forage legumes: temperate and tropical. pp: 861-893 *in* R. D. Munson (ed.). Potassium in agriculture. ASA, Madison, WI.

**Lemaire, G. et Denoix, A. 1987.** Croissance estivale en matière sèche de peuplements de fétuque élevée et de dactyle dans l'Ouest de la France. II. Intraction entre les niveaux d'alimentation hydrique et de nutrition azotée. *Agronomie* **7**: 381-389.

**MacLeod, L. B. 1965.** Effect of nitrogen and potassium on the yield and chemical composition of alfalfa, bromegrass, orchard-grass and timothy grown as pure species. *Agron. J.* **57**: 261-266.

**MacLeod, L. B. et MacLeod, J. A. 1974.** Effects of N and K fertilization on the protein, nitrate and nonprotein reduced N fractions of timothy and bromegrass. *Can. J. Plant Sci.* **54**: 331-341.

**Marschner, H. 1995.** Mineral nutrition of higher plants. Academic Press. London. 889p.

**Menon, R. G., Hammond, L. L. et Sissingh, H. 1989.** Determination of plant-available phosphorus by the iron hydroxide-impregnated filter paper (Pi) soil test. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **53**: 110-115.

**Neeteson, J. J. 1995.** Nitrogen management for intensively grown arable crops and field vegetables. Pages 295-325 *in* P.E. Bacon, ed. Nitrogen fertilization in the environment. Marcel Dekker, Inc. N.Y.

**Nelson, C. J., Bucholtz, D. D., Moore, K. C., et Jennings, J. A. 1992.** Phosphorus and potassium affect alfalfa persistence. *Better crop.* **76**: 18-21.

**Németh, K. 1979.** The availability of nutrients in the soil as determined by electro-ultrafiltration (EUF). *Adv. Agron.* **31**: 155-187.

**Németh, K. 1982.** Electro-Ultrafiltration of aqueous soil suspensions with simultaneous varying temperature and voltage. *Plant Soil*. **64**: 7-23.

**Németh, K. 1985.** Recent advances in EUF research (1980-1983). *Plant Soil* **83**: 1-19.

**Paré, T., Gregorich, E. G. et Ellert, B. H. 1995.** Comparison of soil nitrate extracted by potassium chloride and adsorbed on an anion exchange membrane in situ. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* **26**: 883-898.

**Petit, H. V., Pesant, A. R., Barnett, G. M., Mason, W. N. et Dionne, J. L. 1992.** Quality and morphological characteristics of alfalfa as affected by soil moisture, pH, and phosphorus fertilization. *Can. J. Plant Sci.* **72**: 147-162.

**Qian, P., Schoenau, J. J. et Huang, W. Z. 1992.** Use of ion exchange membranes in routine soil testing. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* **23**: 1791-1804.

**Richards, J. E. 1993.** Chemical characterization of plant tissue. Pages 115-139. *dans* M. R. Carter, ed. *Soil sampling and methods of analysis*. Canadian Society of Soil Science. Lewis Publishers, Boca Raton, FL.

**Robert, M. 1996.** Les pollutions diffuses par les nitrates et les phosphates. Pages 119-142. *Dans*. Masson, S. A. ed. *Le sol: interface dans l'environnement, ressource pour le développement*.

**Rompré, M. et Carrier, D. 1997.** Étude pédologique des sols défrichés de l'Abitibi-Témiscamingue. MAPAQ (ISBN 2-550-30732-1). Bibliothèque nationale du Québec. Québec.

**Ryan, M., Edin, W. F. et Bryan, W. B. 1972.** Nitrate-N levels of perennial grasses affected by time and level of nitrogen application. *Agron. J.* **64**: 165-168.

**Salette, J. et Huché, L. 1991.** Diagnostic de l'état de nutrition minérale d'une prairie par l'analyse de végétal: principes, mise en œuvre, exemples. *Fourrages* **125**: 3-18

**Sanderson, M. A. et Jones, R. M. 1993.** Stand dynamics and yield components of alfalfa as affected by phosphorus fertility. *Agron. J.* **85**: 241-246.

**Sanderson, M. A., Stair, D. W. et Hussey, M. A. 1997.** Physiological and morphological responses of perennial forages to stress. *Advances in Agronomy* **59**:171-224.

**Sheldrick, B. H et Wang, C. 1993.** Particle size distribution. Pages 499-511. *in* M. R. Carter, ed. *Soil sampling and methods of analysis*. Canadian Society of Soil Science. Lewis Publishers, Boca Raton, FL.

**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 227pp.

**Simard, R. R. et Tran, T. S. 1993.** Evaluating plant-available phosphorus with the electro-ultrafiltration technique. *Soil Sci. Soc. Am.J.* **57**: 404-409.

**Simard, R. R. Angers, D. A. et Lapierre, C. 1994.** Soil organic matter quality as influenced by tillage, lime and phosphorus. *Biol. Fertil. Soils* **18**: 13-18.

**Simard, R. R., Zizka, J. et DeKimpe, C. R. 1990.** Le prélèvement du K par la luzerne (*Medicago sativa* L.) et sa dynamique dans 30 sols du Québec. *Can. J. Soil Sci.* **70**: 379-393.

**Simard, R. R., C. R. DeKimpe et J. Zizka. 1992.** Release of potassium and magnesium from soil fractions and its kinetics. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **56**: 1421-1428.

**Simard, R. R., DeKimpe, C. R. et Zizka, J. 1989.** The kinetic of non exchangeable potassium and magnesium released from Quebec soils. *Can. J. Soil Sci.* **69**: 663-675.

**Simard, R. R., Tran, T. S. et Zizka, J. 1991.** Evaluation of the electro-ultrafiltration technique (EUF) as a measure of the supplying power of Quebec soils. *Plant and Soil* **132**: 91-101.

**Sims, J. T. 1995.** Organic wastes as alternative N sources. Pages 487-535 in P. E. Bacon ed. *Nitrogen fertilization in the environment*.

**Sinclair, A. G., Morrison, J. D., Smith, L. C. et Dodds, K. G. 1997.** Effects and interactions of phosphorus and sulfur on a mown white clover/reygrass sward. 3. indices of nutrient adequacy. *New Zealand Journal of Agricultural Research*. **40**: 297-307.

**Skogley, E. O. 1994.** Reinventing soil testing for the future. Pages 187-201. *in* J. L. Havlin, ed. *Soil Testing: Prospects for improving nutrient recommendations*. SSSA Spec. Publ. 40. ASA and SSSA, Madison, WI.

**Skogley, E. O. et Dobermann, A. 1996.** Synthetic ion-exchange resins: soil and environmental studies. *J. Environ. Qual.* **25**: 13-24.

**Steffens, D. 1994.** Phosphorus release kinetics and extractable phosphorus after long-term fertilization. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **58**: 1702-1708.

**St-Pierre, J. C. et Pelletier, G. 1977.** Effet de l'application d'azote et du stade de croissance à la récolte sur la performance de la fléole des prés (*Pheum Pratense*). *Can. J. Plant Sci.* **57**: 955-962.

**Subler, S., Blair, J. M. et Edwards, C. A. 1995.** Using anion-exchange membranes to measure soil nitrate availability and net nitrification. *Soil Biol. Biochem.* **27**: 911-917.

**Surprenant, J., and Lafrenière, C. 1992.** Site, Nitrogen and Management effects on Timothy yield and quality. Rapport d'étape. 35p.

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

**Taha, M. A., Malik, M. N., Makhdam, M. J. et Chandry, I. I. 1982.** Preliminary investigation on available phosphorus using electro-ultrafiltration (EUF). *Plant Soil* **64**: 73-79.

**Tiessen, H. et Moir, J. O. 1993.** Total and organic carbon. Pages 187-199. *in* M. R. Carter, ed. *Soil sampling and methods of analyses*. Canadian Society of Soil Science. Lewis Publishers, Boca Raton, FL.

**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., Tabi, M. et DeKimpe, C. R. 1987.** Relation du potassium extrait par EUF et quelques méthodes chimiques avec les propriétés du sol et le rendement des plantes. *Can. J. Soil Sci.* **67**: 17-31.

**Tran, T. S., Simard, R. R. et Fardeau, J. C. 1992c.** A comparison of four resin extractions and <sup>32</sup>P isotopic exchange for the assessment of plant-available P. *Can. J. Soil Sci.* **72**: 281-294.

**Tran, T. S., Simard, R. R. et Tabi, M. 1992b.** Evaluation of the electro-ultrafiltration technique (EUF) to determine available P in neutral and calcareous soils. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* **23 (17-20)**: 2261-2281.

**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, Fl.

**Tran, T. S., Giroux, M. et N'Dayegamiye, A. 1992a.** Utilisation rationnelle des fumures azotées minérales: aspects agronomiques et environnementaux. *Agrosol V (2)*: 18-25.

**Villeneuve, G. O. 1967.** Sommaire climatique d'Amos, Comté d'Abitibi. M. P., Ministère des richesses Naturelles. Vol. 12.68pp.

**Whitehead, D. C. 1995.** Grassland nitrogen. CAB Intern., Oxford, UK.386pp.

**Yang, J. E., Skogley, E. O., Georgitis, S. J., Schaff, B. E. et Ferguson, A. H. 1991.** Phyto-availability soil test: development and verification of theory. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **55**: 1358-1365.

## **ANNEXES**



## Annexe 1: Effet de P sur le rendement et le prélèvement en P par les fourrages

annee	site	Bloc	Traitement	coupe	Rendement (Mg ha <sup>-1</sup> )	Prélèvement de P (kg ha <sup>-1</sup> )				
1994	Ste-Gertrude		P0	1	1.17	4.41				
				2	1.55	5.28				
				3	1.00	3.28				
				4	0.89	2.78				
				1	3.05	8.62				
				2	3.21	9.59				
				3	3.34	9.18				
				4	2.73	6.11				
				<b>Moyenne des deux coupes</b>				<b>4.23</b>	<b>12.31</b>	
				1995				1	1.33	3.85
								2	1.47	4.25
								3	1.73	5.47
4	1.11	3.19								
1	1.86	5.28								
2	1.77	4.55								
3	1.29	3.49								
4	0.79	1.89								
<b>Moyenne des deux coupes</b>								<b>2.84</b>	<b>7.99</b>	
1996								1	1.47	4.01
								2	0.84	1.89
								3	1.02	2.94
				4	0.72	1.82				
				1	1.95	5.27				
				2	2.33	6.27				
				3	1.56	4.80				
				4	1.82	5.23				
				<b>Moyenne des deux coupes</b>				<b>2.93</b>	<b>8.06</b>	
				1994			P30	1	1.07	3.61
								2	1.26	4.14
								3	1.23	4.34
4	1.19	4.05								
1	2.84	8.37								
2	3.27	9.87								
3	2.64	7.26								
4	3.03	8.48								
<b>Moyenne des deux coupes</b>								<b>4.13</b>	<b>12.53</b>	
1995								1	1.63	5.22
								2	1.56	4.77
								3	1.38	4.22
				4	1.16	3.31				
				1	1.61	5.07				
				2	1.94	5.36				
				3	1.14	3.26				
				4	1.82	4.98				
				<b>Moyenne des deux coupes</b>				<b>3.06</b>	<b>9.05</b>	
				1996				1	1.27	3.57
								2	0.84	2.29
								3	1.21	3.41
4	1.09	2.88								

	1		2	1.68	5.80
	2		2	2.58	7.79
	3		2	1.88	6.47
	4		2	2.05	5.77
<b>Moyenne des deux coupes 1994</b>				<b>3.15</b>	<b>9.50</b>
	1	<b>P60</b>	1	1.14	3.99
	2		1	1.53	5.28
	3		1	1.49	5.44
	4		1	1.17	3.52
	1		2	2.80	8.40
	2		2	3.39	10.91
	3		2	3.15	8.99
	4		2	3.19	8.86
<b>Moyenne des deux coupes 1995</b>				<b>4.46</b>	<b>13.85</b>
	1		1	0.93	3.11
	2		1	1.59	5.42
	3		1	1.53	5.73
	4		1	1.53	4.70
	1		2	1.87	5.23
	2		2	2.27	6.84
	3		2	2.29	6.87
	4		2	1.52	4.36
<b>Moyenne des deux coupes 1996</b>				<b>3.38</b>	<b>10.57</b>
	1		1	0.95	2.70
	2		1	1.69	4.76
	3		1	1.21	3.39
	4		1	1.18	3.37
	1		2	2.02	7.30
	2		2	2.45	9.64
	3		2	2.81	7.52
	4		2	2.00	6.04
<b>Moyenne des deux coupes 1994</b>				<b>3.58</b>	<b>11.18</b>
	1	<b>P90</b>	1	1.47	5.35
	2		1	1.47	5.58
	3		1	1.33	5.25
	4		1	1.16	3.95
	1		2	3.08	9.83
	2		2	3.66	11.05
	3		2	2.92	8.23
	4		2	2.80	8.30
<b>Moyenne des deux coupes 1995</b>				<b>4.47</b>	<b>14.38</b>
	1		1	1.10	3.81
	2		1	2.06	7.36
	3		1	1.88	6.68
	4		1	1.24	4.05
	1		2	1.54	5.08
	2		2	1.97	6.39
	3		2	1.98	6.75
	4		2	1.55	4.96
<b>Moyenne des deux coupes 1996</b>				<b>3.33</b>	<b>11.27</b>
	1		1	1.15	3.81
	2		1	1.42	4.49

	3		1	1.60	5.21
	4		1	1.28	3.82
	1		2	2.11	7.34
	2		2	2.99	10.86
	3		2	2.15	7.38
	4		2	2.78	9.49
<b>Moyenne des deux coupes</b>				<b>3.87</b>	<b>13.10</b>
<b>1994</b>	1	<b>P120</b>	1	1.21	5.34
	2		1	1.62	5.40
	3		1	1.26	4.28
	4		1	0.95	2.76
	1		2	2.99	10.30
	2		2	3.31	9.70
	3		2	3.07	9.26
	4		2	2.42	7.44
<b>Moyenne des deux coupes</b>				<b>4.21</b>	<b>13.62</b>
<b>1995</b>	1		1	1.39	5.66
	2		1	1.64	6.05
	3		1	1.79	6.78
	4		1	1.11	3.72
	1		2	1.80	6.75
	2		2	1.92	6.75
	3		2	1.76	5.76
	4		2	1.89	6.28
<b>Moyenne des deux coupes</b>				<b>3.32</b>	<b>11.94</b>
<b>1996</b>	1		1	1.40	4.18
	2		1	0.81	2.26
	3		1	0.99	3.18
	4		1	1.34	4.07
	1		2	2.05	6.69
	2		2	2.75	9.64
	3		2	2.24	7.55
	4		2	2.58	9.62
<b>Moyenne des deux coupes</b>				<b>3.54</b>	<b>11.80</b>
<b>1994</b>		<b>Palmarolle</b>			
	1	<b>P0</b>	1	2.23	5.87
	2		1	1.57	4.90
	3		1	1.82	5.24
	4		1	2.29	6.67
	1		2	3.77	9.91
	2		2	2.83	7.88
	3		2	3.04	8.30
	4		2	2.98	7.53
<b>Moyenne des deux coupes</b>				<b>5.13</b>	<b>14.08</b>
<b>1995</b>	1		1	2.41	6.57
	2		1	2.33	7.66
	3		1	2.45	7.72
	4		1	2.05	4.84
	1		2	3.40	8.52
	2		2	2.47	8.22
	3		2	2.55	8.31
	4		2	2.92	7.14
<b>Moyenne des deux coupes</b>				<b>5.15</b>	<b>14.74</b>

<b>1996</b>	1		1	2.27	5.75
	2		1	1.96	5.86
	3		1	2.26	7.07
	4		1	1.91	5.29
	1		2	2.73	7.23
	2		2	1.90	6.21
	3		2	2.25	7.39
	4		2	2.00	6.06
<b>Moyenne des deux coupes</b>				<b>4.32</b>	<b>12.71</b>
<b>1994</b>	1	<b>P30</b>	1	2.28	6.71
	2		1	2.24	6.64
	3		1	2.17	6.15
	4		1	2.41	6.66
	1		2	3.23	9.67
	2		2	2.27	7.17
	3		2	3.29	9.50
	4		2	3.12	7.30
<b>Moyenne des deux coupes</b>				<b>5.25</b>	<b>14.95</b>
<b>1995</b>	1		1	2.52	7.23
	2		1	2.89	10.21
	3		1	2.31	6.60
	4		1	2.18	6.17
	1		2	3.41	10.26
	2		2	2.06	7.83
	3		2	2.62	8.42
	4		2	3.12	9.06
<b>Moyenne des deux coupes</b>				<b>5.27</b>	<b>16.44</b>
<b>1996</b>	1		1	2.50	7.33
	2		1	2.25	7.49
	3		1	2.22	6.80
	4		1	1.96	6.28
	1		2	2.71	8.55
	2		2	2.08	7.46
	3		2	2.28	7.60
	4		2	2.25	7.08
<b>Moyenne des deux coupes</b>				<b>4.56</b>	<b>14.65</b>
<b>1994</b>	1	<b>P60</b>	1	2.36	7.04
	2		1	2.14	6.43
	3		1	2.17	5.89
	4		1	1.99	6.53
	1		2	3.07	8.99
	2		2	3.19	8.08
	3		2	3.75	9.89
	4		2	3.18	8.00
<b>Moyenne des deux coupes</b>				<b>5.46</b>	<b>15.22</b>
<b>1995</b>	1		1	2.97	9.55
	2		1	2.51	7.65
	3		1	2.05	6.07
	4		1	2.26	7.29
	1		2	2.55	8.73
	2		2	3.23	10.10
	3		2	3.27	10.96

	4		2	2.32	8.14
<b>Moyenne des deux coupes</b>				<b>5.29</b>	<b>17.12</b>
<b>1996</b>	1		1	2.11	7.06
	2		1	2.49	8.20
	3		1	2.23	7.06
	4		1	1.83	6.17
	1		2	2.59	8.80
	2		2	2.20	7.70
	3		2	1.75	6.54
	4		2	2.31	7.57
<b>Moyenne des deux coupes</b>				<b>4.38</b>	<b>14.77</b>
<b>1994</b>	1	<b>P90</b>	1	1.98	5.15
	2		1	2.68	7.21
	3		1	2.60	7.59
	4		1	1.48	4.55
	1		2	3.41	9.49
	2		2	2.95	8.75
	3		2	3.22	8.29
	4		2	2.99	7.81
<b>Moyenne des deux coupes</b>				<b>5.33</b>	<b>14.71</b>
<b>1995</b>	1		1	2.58	9.06
	2		1	1.99	6.25
	3		1	2.64	7.65
	4		1	1.94	6.33
	1		2	2.45	8.96
	2		2	3.51	11.58
	3		2	4.00	13.86
	4		2	2.80	9.96
<b>Moyenne des deux coupes</b>				<b>5.48</b>	<b>18.41</b>
<b>1996</b>	1		1	2.24	7.23
	2		1	2.33	7.56
	3		1	2.17	7.40
	4		1	1.99	6.65
	1		2	2.57	9.54
	2		2	2.56	8.12
	3		2	2.27	8.03
	4		2	2.32	7.61
<b>Moyenne des deux coupes</b>				<b>4.61</b>	<b>15.54</b>
<b>1994</b>	1	<b>P120</b>	1	2.58	9.41
	2		1	2.49	7.68
	3		1	2.05	6.80
	4		1	1.81	6.28
	1		2	3.18	10.84
	2		2	2.60	8.00
	3		2	3.56	9.47
	4		2	2.97	10.13
<b>Moyenne des deux coupes</b>				<b>5.31</b>	<b>17.15</b>
<b>1995</b>	1		1	3.04	9.37
	2		1	2.39	7.46
	3		1	3.01	11.06
	4		1	2.61	10.51
	1		2	3.59	14.04

			2		3.39	12.50
			3		2.66	8.55
			4		2.39	10.65
<b>Moyenne des deux coupes</b>					<b>5.77</b>	<b>21.03</b>
<b>1996</b>			1	1	3.39	10.91
			2	1	2.48	7.89
			3	1	1.93	6.26
			4	1	1.71	6.84
			1	2	3.67	12.67
			2	2	2.38	8.96
			3	2	2.59	8.91
			4	2	2.80	11.48
<b>Moyenne des deux coupes</b>					<b>5.24</b>	<b>18.48</b>
<b>1994</b>	<b>Laverlochère</b>		1	<b>P0</b>	1.85	6.45
			2		1.85	6.31
			3		1.88	6.37
			4		2.02	6.36
			1	2	2.67	6.75
			2	2	2.75	8.21
			3	2	2.69	6.99
			4	2	2.66	8.06
<b>Moyenne des deux coupes</b>					<b>4.59</b>	<b>13.87</b>
<b>1995</b>			1	1	3.30	9.39
			2	1	2.57	8.15
			3	1	3.19	8.25
			4	1	3.38	11.65
			1	2	2.63	7.17
			2	2	2.63	7.65
			3	2	1.68	5.54
			4	2	2.20	6.96
<b>Moyenne des deux coupes</b>					<b>5.40</b>	<b>16.19</b>
<b>1996</b>			1	1	3.20	8.54
			2	1	2.97	8.28
			3	1	1.88	5.45
			4	1	2.94	8.32
			1	2	2.25	5.79
			2	2	2.02	6.88
			3	2	1.73	5.66
			4	2	2.03	6.60
<b>Moyenne des deux coupes</b>					<b>4.75</b>	<b>13.88</b>
<b>1994</b>			1	<b>P30</b>	1.80	6.62
			2		2.01	6.72
			3		1.99	6.52
			4		1.97	6.53
			1	2	2.58	7.62
			2	2	2.30	6.52
			3	2	2.57	8.07
			4	2	2.71	6.57
<b>Moyenne des deux coupes</b>					<b>4.48</b>	<b>13.79</b>
<b>1995</b>			1	1	2.94	9.47
			2	1	2.51	8.15
			3	1	2.60	8.18

	4		1	2.72	8.82
	1		2	2.42	8.05
	2		2	1.78	5.64
	3		2	2.80	9.31
	4		2	1.77	5.84
<b>Moyenne des deux coupes 1996</b>				<b>4.88</b>	<b>15.86</b>
	1		1	2.99	8.26
	2		1	2.81	12.19
	3		1	2.89	7.95
	4		1	2.24	5.51
	1		2	2.59	8.95
	2		2	2.12	7.92
	3		2	1.60	5.84
	4		2	2.48	8.89
<b>Moyenne des deux coupes 1994</b>				<b>4.93</b>	<b>16.37</b>
	1	<b>P60</b>	1	2.35	8.24
	2		1	1.35	4.64
	3		1	1.78	5.70
	4		1	2.23	7.91
	1		2	2.59	7.48
	2		2	2.53	6.67
	3		2	2.99	8.10
	4		2	2.50	7.44
<b>Moyenne des deux coupes 1995</b>				<b>4.58</b>	<b>14.05</b>
	1		1	3.28	11.29
	2		1	3.14	9.89
	3		1	2.98	9.61
	4		1	3.28	10.98
	1		2	2.93	8.77
	2		2	1.65	5.70
	3		2	2.62	9.42
	4		2	2.52	8.97
<b>Moyenne des deux coupes 1996</b>				<b>5.60</b>	<b>18.66</b>
	1		1	3.16	10.17
	2		1	3.23	10.24
	3		1	3.04	8.43
	4		1	2.67	8.80
	1		2	2.23	8.08
	2		2	2.23	8.23
	3		2	1.89	7.13
	4		2	2.35	8.92
<b>Moyenne des deux coupes 1994</b>				<b>5.20</b>	<b>17.50</b>
	1	<b>P90</b>	1	2.02	7.44
	2		1	1.59	5.16
	3		1	2.01	7.23
	4		1	2.49	8.77
	1		2	2.69	6.84
	2		2	2.92	8.98
	3		2	2.57	7.83
	4		2	2.70	8.03
<b>Moyenne des deux coupes 1995</b>				<b>4.75</b>	<b>15.07</b>
	1		1	3.03	10.52

	2		1	2.26	7.55
	3		1	2.73	9.45
	4		1	3.18	11.59
	1		2	2.31	7.64
	2		2	2.19	7.88
	3		2	2.01	7.11
	4		2	2.63	9.43
<b>Moyenne des deux coupes</b>				<b>5.09</b>	<b>17.79</b>
<b>1996</b>	1		1	2.78	8.19
	2		1	2.85	12.57
	3		1	2.36	6.73
	4		1	2.99	8.92
	1		2	1.97	7.13
	2		2	1.96	7.41
	3		2	2.34	8.13
	4		2	2.25	8.71
<b>Moyenne des deux coupes</b>				<b>4.88</b>	<b>16.94</b>
<b>1994</b>	1	<b>P120</b>	1	1.93	6.56
	2		1	1.93	6.81
	3		1	2.14	7.34
	4		1	2.06	7.02
	1		2	2.90	8.11
	2		2	2.06	5.80
	3		2	2.85	7.71
	4		2	2.90	8.17
<b>Moyenne des deux coupes</b>				<b>4.69</b>	<b>14.38</b>
<b>1995</b>	1		1	2.61	9.00
	2		1	2.49	8.51
	3		1	3.12	10.26
	4		1	2.75	9.34
	1		2	2.43	8.82
	2		2	2.55	8.26
	3		2	2.63	8.55
	4		2	2.57	9.28
<b>Moyenne des deux coupes</b>				<b>5.29</b>	<b>18.00</b>
<b>1996</b>	1		1	3.64	10.65
	2		1	3.36	10.91
	3		1	2.58	7.76
	4		1	2.67	7.41
	1		2	2.69	9.13
	2		2	2.47	10.20
	3		2	2.25	7.61
	4		2	2.25	8.77
<b>Moyenne des deux coupes</b>				<b>5.48</b>	<b>18.11</b>
<b>1994</b>	1	<b>P0</b>	1	2.06	4.89
	2		1	1.94	5.25
	3		1	1.96	6.63
	4		1	2.26	6.92
	1		2	1.86	5.45
	2		2	2.17	6.21
	3		2	2.32	9.89
	4		2	2.56	8.10



<b>Moyenne des deux coupes</b>			<b>4.28</b>	<b>13.33</b>
<b>1995</b>	1		2.52	6.31
	2		3.04	6.96
	3		2.87	10.34
	4		2.64	7.47
	1		1.79	4.39
	2		2.36	6.27
	3		2.19	9.11
	4		2.14	7.23
<b>Moyenne des deux coupes</b>			<b>4.88</b>	<b>14.52</b>
<b>1996</b>	1		1.39	2.75
	2		1.93	4.65
	3		3.22	11.98
	4		1.91	4.80
	1		1.33	5.16
	2		2.09	5.92
	3		1.91	8.21
	4		1.80	6.38
<b>Moyenne des deux coupes</b>			<b>3.90</b>	<b>12.46</b>
<b>1994</b>	1	<b>P30</b>	1.73	5.91
	2		2.72	7.83
	3		2.12	6.88
	4		2.17	6.70
	1		2.34	10.26
	2		1.90	7.67
	3		1.93	8.79
	4		2.58	9.17
<b>Moyenne des deux coupes</b>			<b>4.37</b>	<b>15.80</b>
<b>1995</b>	1		2.96	11.15
	2		3.07	10.06
	3		2.07	8.61
	4		2.95	9.69
	1		2.56	9.97
	2		2.27	8.31
	3		2.10	8.59
	4		2.44	8.84
<b>Moyenne des deux coupes</b>			<b>5.10</b>	<b>18.81</b>
<b>1996</b>	1		2.32	7.10
	2		2.87	9.18
	3		2.35	7.92
	4		2.45	7.56
	1		1.64	8.06
	2		1.78	8.12
	3		2.10	10.05
	4		1.60	7.15
<b>Moyenne des deux coupes</b>			<b>4.28</b>	<b>16.28</b>
<b>1994</b>	1	<b>P60</b>	2.56	8.71
	2		2.14	7.09
	3		2.72	8.96
	4		2.34	8.02
	1		2.16	9.77
	2		2.51	11.15

	3		2	1.53	7.10
	4		2	2.46	10.71
<b>Moyenne des deux coupes</b>				<b>4.60</b>	<b>17.88</b>
<b>1995</b>	1		1	3.14	10.88
	2		1	3.26	12.78
	3		1	2.39	10.21
	4		1	2.89	11.25
	1		2	2.82	10.57
	2		2	2.29	8.25
	3		2	1.85	8.04
	4		2	2.43	10.19
<b>Moyenne des deux coupes</b>				<b>5.27</b>	<b>20.54</b>
<b>1996</b>	1		1	2.82	8.57
	2		1	2.84	8.49
	3		1	2.29	7.36
	4		1	2.57	8.45
	1		2	1.68	7.37
	2		2	2.46	10.03
	3		2	2.09	11.00
	4		2	1.71	8.45
<b>Moyenne des deux coupes</b>				<b>4.61</b>	<b>17.43</b>
<b>1994</b>	1	<b>P90</b>	1	1.28	4.17
	2		1	2.08	6.46
	3		1	2.69	8.83
	4		1	1.85	5.86
	1		2	2.76	11.35
	2		2	2.52	7.57
	3		2	1.64	6.70
	4		2	2.58	10.97
<b>Moyenne des deux coupes</b>				<b>4.35</b>	<b>15.48</b>
<b>1995</b>	1		1	3.25	11.41
	2		1	2.82	9.16
	3		1	3.09	10.52
	4		1	2.55	9.99
	1		2	2.49	9.96
	2		2	2.10	7.62
	3		2	2.01	7.84
	4		2	2.19	8.40
<b>Moyenne des deux coupes</b>				<b>5.13</b>	<b>18.72</b>
<b>1996</b>	1		1	2.88	9.32
	2		1	2.20	6.32
	3		1	2.40	8.47
	4		1	2.43	7.62
	1		2	3.02	13.30
	2		2	2.36	10.69
	3		2	1.70	8.52
	4		2	1.88	9.74
<b>Moyenne des deux coupes</b>				<b>4.72</b>	<b>18.49</b>
<b>1994</b>	1	<b>P120</b>	1	1.56	5.51
	2		1	1.84	5.65
	3		1	2.16	7.47
	4		1	2.06	7.11

	1	2	2.27	9.80
	2	2	2.52	8.81
	3	2	2.02	8.92
	4	2	1.87	6.68
<b>Moyenne des deux coupes</b>			<b>4.08</b>	<b>14.99</b>
<b>1995</b>	1	1	3.21	12.09
	2	1	3.26	11.19
	3	1	3.57	12.82
	4	1	3.16	11.74
	1	2	2.09	9.08
	2	2	2.96	11.07
	3	2	2.69	10.97
	4	2	2.48	9.20
<b>Moyenne des deux coupes</b>			<b>5.85</b>	<b>22.04</b>
<b>1996</b>	1	1	2.58	9.21
	2	1	2.37	7.21
	3	1	3.23	10.94
	4	1	2.39	7.60
	1	2	1.86	10.07
	2	2	2.40	11.26
	3	2	1.60	8.40
	4	2	3.26	13.79
<b>Moyenne des deux coupes</b>			<b>4.92</b>	<b>19.62</b>

## Annexe 2: Effet de K sur le rendement et le prélèvement en K par les fourrages

annee	site	bloc	Traitement	Coupe	Rendement (Mg ha <sup>-1</sup> )	Prélèvement en K (kg ha <sup>-1</sup> )	
1994	Ste-Gertrude	1	K0	1	1.66	43.44	
		2		1	1.53	40.40	
		3		1	1.26	33.55	
		4		1	1.29	33.77	
		1		2	2.69	62.21	
		2		2	3.43	88.04	
		3		2	2.67	76.83	
		4		2	2.56	65.49	
	<b>Moyenne des deux coupes</b>					<b>4.27</b>	<b>110.93</b>
	Palmarolle	1		1	1.95	37.37	
		2		1	1.74	35.65	
		3		1	1.71	32.46	
		4		1	2.28	46.38	
		1		2	2.82	73.36	
		2		2	2.88	78.45	
		3		2	2.41	65.04	
4			2	3.01	76.30		
<b>Moyenne des deux coupes</b>					<b>4.70</b>	<b>111.25</b>	
Laverlochere	1		1	2.16	52.99		
	2		1	1.89	43.54		
	3		1	1.86	48.95		
	4		1	1.85	48.25		
	1		2	2.74	84.47		
	2		2	2.30	63.10		
	3		2	2.39	69.22		
	4		2	2.80	85.46		
<b>Moyenne des deux coupes</b>					<b>4.49</b>	<b>123.99</b>	
Lorrainville	1		1	1.95	55.26		
	2		1	2.73	74.24		
	3		1	1.81	49.48		
	4		1	1.92	52.90		
	1		2	2.07	74.30		
	2		2	2.12	70.18		
	3		2	2.18	85.18		
	4		2	1.91	80.51		
<b>Moyenne des deux coupes</b>					<b>4.17</b>	<b>135.51</b>	
1994	Ste-Gertrude	1	K50	1	1.40	42.55	
		2		1	1.60	47.86	
		3		1	1.29	34.85	
		4		1	1.01	27.48	
		1		2	3.18	87.37	
		2		2	3.20	85.82	
		3		2	3.23	79.18	
		4		2	3.00	76.23	
	<b>Moyenne des deux coupes</b>					<b>4.48</b>	<b>120.33</b>
	Palmarolle	1		1	2.04	39.95	
		2		1	2.74	51.48	
		3		1	1.91	38.19	
		4		1	2.33	44.14	
		1		2	3.17	78.27	
		2		2	3.24	74.68	

	3		2	3.95	97.13
	4		2	2.98	61.62
<b>Moyenne des deux coupes</b>				<b>5.59</b>	<b>121.37</b>
<b>Laverlochere</b>	1		1	1.94	51.24
	2		1	1.30	37.34
	3		1	1.79	46.95
	4		1	2.24	68.21
	1		2	2.50	81.85
	2		2	2.44	79.96
	3		2	3.00	94.81
	4		2	2.54	82.45
<b>Moyenne des deux coupes</b>				<b>4.44</b>	<b>135.70</b>
<b>Lorraineville</b>	1		1	2.69	78.31
	2		1	2.00	53.99
	3		1	2.33	66.53
	4		1	2.61	75.11
	1		2	2.46	88.73
	2		2	1.89	69.17
	3		2	2.44	81.61
	4		2	1.93	71.18
				<b>4.59</b>	<b>146.15</b>
<b>Ste-Gertrude</b>	1	<b>K100</b>	1	1.75	48.01
	2		1	1.43	39.13
	3		1	1.24	36.53
	4		1	1.01	29.72
	1		2	2.87	72.40
	2		2	2.96	87.13
	3		2	2.66	66.15
	4		2	2.72	84.57
<b>Moyenne des deux coupes</b>				<b>4.16</b>	<b>115.91</b>
<b>Palmarolle</b>	1		1	2.14	40.08
	2		1	2.64	50.08
	3		1	1.99	40.35
	4		1	2.12	42.94
	1		2	3.35	94.90
	2		2	3.69	77.43
	3		2	3.25	87.74
	4		2	3.43	85.18
<b>Moyenne des deux coupes</b>				<b>5.65</b>	<b>129.68</b>
<b>Laverlochere</b>	1		1	2.29	58.23
	2		1	1.73	48.55
	3		1	1.79	52.90
	4		1	2.10	60.57
	1		2	2.87	93.58
	2		2	2.51	90.08
	3		2	2.19	78.47
	4		2	2.49	85.66
<b>Moyenne des deux coupes</b>				<b>4.49</b>	<b>142.01</b>
<b>Lorraineville</b>	1		1	2.18	56.05
	2		1	1.35	34.30
	3		1	2.33	60.48
	4		1	1.91	55.38
	1		2	1.96	78.52

	2		2	2.20	103.85
	3		2	2.43	87.66
	4		2	2.62	104.00
<b>Moyenne des deux coupes</b>				<b>4.25</b>	<b>145.06</b>
<b>Ste-Gertrude</b>	1	<b>K150</b>	1	1.25	33.90
	2		1	1.39	50.42
	3		1	1.30	38.79
	4		1	0.98	28.37
	1		2	2.59	78.20
	2		2	2.97	105.52
	3		2	3.93	110.46
	4		2	3.38	86.07
<b>Moyenne des deux coupes</b>				<b>4.45</b>	<b>132.93</b>
<b>Palmarolle</b>	1		1	2.91	56.14
	2		1	2.38	49.04
	3		1	1.74	35.77
	4		1	1.68	33.34
	1		2	3.56	96.45
	2		2	2.49	65.43
	3		2	3.26	81.36
	4		2	3.03	73.88
<b>Moyenne des deux coupes</b>				<b>5.26</b>	<b>122.85</b>
<b>Laverlochere</b>	1		1	2.33	63.27
	2		1	1.16	34.51
	3		1	2.04	59.33
	4		1	2.00	54.96
	1		2	3.18	98.35
	2		2	2.16	75.25
	3		2	2.24	68.94
	4		2	2.53	80.05
<b>Moyenne des deux coupes</b>				<b>4.41</b>	<b>133.67</b>
<b>Lorrainville</b>	1		1	2.20	63.20
	2		1	2.98	91.50
	3		1	1.62	47.99
	4		1	2.17	62.73
	1		2	1.20	45.24
	2		2	2.21	92.75
	3		2	1.92	70.33
	4		2	2.11	92.82
<b>Moyenne des deux coupes</b>				<b>4.10</b>	<b>141.64</b>
<b>Ste-Gertrude</b>	1	<b>K200</b>	1	1.33	39.98
	2		1	1.77	45.27
	3		1	1.29	40.63
	4		1	1.03	27.82
	1		2	3.91	113.58
	2		2	2.93	89.51
	3		2	2.92	93.98
	4		2	3.03	80.68
<b>Moyenne des deux coupes</b>				<b>4.55</b>	<b>132.86</b>
<b>Palmarolle</b>	1		1	2.71	51.91
	2		1	1.99	41.15
	3		1	2.21	42.92
	4		1	2.40	48.34

		1		2	3.35	77.85
		2		2	2.44	70.27
		3		2	3.47	79.54
		4		2	3.08	73.40
	<b>Moyenne des deux coupes</b>				<b>5.42</b>	<b>121.35</b>
	<b>Laverlochere</b>	1		1	1.96	53.01
		2		1	1.95	56.52
		3		1	1.79	51.45
		4		1	1.90	50.45
		1		2	2.60	76.86
		2		2	2.57	84.65
		3		2	2.82	97.64
		4		2	2.67	87.15
	<b>Moyenne des deux coupes</b>				<b>4.56</b>	<b>139.43</b>
	<b>Lorrainville</b>	1		1	2.02	67.02
		2		1	1.97	55.44
		3		1	2.50	75.45
		4		1	1.74	49.85
		1		2	2.65	108.76
		2		2	2.13	93.87
		3		2	2.19	81.02
		4		2	2.35	111.63
	<b>Moyenne des deux coupes</b>				<b>4.39</b>	<b>160.76</b>
	<b>1995 Ste-Gertrude</b>	1	<b>K0</b>	1	0.99	17.71
		2		1	1.61	33.59
		3		1	1.75	43.93
		4		1	1.38	37.72
		1		2	1.54	40.01
		2		2	2.22	57.78
		3		2	1.62	45.25
		4		2	1.24	34.40
	<b>Moyenne des deux coupes</b>				<b>3.09</b>	<b>77.60</b>
	<b>Palmarolle</b>	1		1	2.96	74.36
		2		1	3.23	88.40
		3		1	2.64	84.13
		4		1	2.26	57.00
		1		2	2.72	86.38
		2		2	2.18	63.58
		3		2	2.15	58.63
		4		2	2.43	72.70
	<b>Moyenne des deux coupes</b>				<b>5.14</b>	<b>146.30</b>
	<b>Laverlochere</b>	1		1	3.44	96.30
		2		1	2.90	68.15
		3		1	3.30	81.61
		4		1	2.76	72.64
		1		2	2.39	71.80
		2		2	2.19	64.02
		3		2	2.33	71.39
		4		2	2.09	60.91
	<b>Moyenne des deux coupes</b>				<b>5.35</b>	<b>146.71</b>
	<b>Lorrainville</b>	1		1	2.79	77.63
		2		1	2.64	69.45
		3		1	2.72	82.38
		4		1	2.64	73.62

	1		2	1.95	67.39
	2		2	2.35	61.72
	3		2	2.03	66.99
	4		2	2.56	69.66
<b>Moyenne des deux coupes</b>				<b>4.92</b>	<b>142.21</b>
<b>Ste-Gertrude</b>	1	<b>K50</b>	1	1.18	21.72
	2		1	1.22	25.83
	3		1	1.90	50.95
	4		1	1.39	33.83
	1		2	2.21	55.45
	2		2	1.88	58.22
	3		2	1.46	41.48
	4		2	1.75	49.82
<b>Moyenne des deux coupes</b>				<b>3.24</b>	<b>84.33</b>
<b>Palmarolle</b>	1		1	2.80	61.52
	2		1	1.55	32.16
	3		1	2.55	71.98
	4		1	2.16	51.60
	1		2	3.34	101.77
	2		2	3.29	80.58
	3		2	2.59	82.63
	4		2	2.94	71.71
<b>Moyenne des deux coupes</b>				<b>5.31</b>	<b>138.49</b>
<b>Laverlochere</b>	1		1	2.81	74.72
	2		1	2.15	62.73
	3		1	3.08	76.78
	4		1	2.73	74.78
	1		2	2.10	67.32
	2		2	2.33	82.98
	3		2	1.99	61.99
	4		2	2.30	77.50
<b>Moyenne des deux coupes</b>				<b>4.87</b>	<b>144.70</b>
<b>Lorrainville</b>	1		1	3.31	91.68
	2		1	2.57	80.37
	3		1	2.68	81.35
	4		1	2.46	82.30
	1		2	2.30	74.09
	2		2	2.22	70.47
	3		2	2.78	76.66
	4		2	2.43	74.76
<b>Moyenne des deux coupes</b>				<b>5.19</b>	<b>157.92</b>
<b>Ste-Gertrude</b>	1		1	1.11	21.72
	2	<b>K100</b>	1	1.97	52.08
	3		1	1.67	43.02
	4		1	1.30	37.88
	1		2	1.72	45.26
	2		2	2.15	69.68
	3		2	1.63	49.62
	4		2	1.62	57.55
<b>Moyenne des deux coupes</b>				<b>3.29</b>	<b>94.20</b>
<b>Palmarolle</b>	1		1	2.36	58.61
	2		1	2.53	59.58
	3		1	2.54	68.28
	4		1	2.13	62.28



	1		2	3.53	108.76
	2		2	3.13	105.75
	3		2	2.95	82.16
	4		2	2.83	93.63
<b>Moyenne des deux coupes</b>				<b>5.50</b>	<b>159.76</b>
<b>Laverlochere</b>	1		1	3.53	95.39
	2		1	2.51	60.32
	3		1	3.44	87.16
	4		1	2.33	73.33
	1		2	3.02	90.49
	2		2	2.85	86.78
	3		2	1.94	65.79
	4		2	2.21	79.81
<b>Moyenne des deux coupes</b>				<b>5.46</b>	<b>159.77</b>
<b>Lorrainville</b>	1		1	2.82	100.19
	2		1	2.66	93.89
	3		1	3.04	93.15
	4		1	2.57	81.48
	1		2	2.16	81.22
	2		2	2.17	79.35
	3		2	2.39	79.19
	4		2	2.53	79.49
<b>Moyenne des deux coupes</b>				<b>5.08</b>	<b>171.99</b>
<b>Ste-Gertrude</b>	1		1	1.66	36.99
	2	<b>K150</b>	1	1.41	51.75
	3		1	1.86	56.47
	4		1	1.67	50.56
	1		2	1.89	62.85
	2		2	2.61	85.41
	3		2	1.67	49.38
	4		2	1.67	55.61
<b>Moyenne des deux coupes</b>				<b>3.61</b>	<b>112.25</b>
<b>Palmarolle</b>	1		1	2.99	68.50
	2		1	2.28	57.85
	3		1	2.45	67.98
	4		1	1.73	49.66
	1		2	3.70	125.20
	2		2	3.18	111.20
	3		2	2.21	69.56
	4		2	2.18	79.79
<b>Moyenne des deux coupes</b>				<b>5.18</b>	<b>157.43</b>
<b>Laverlochere</b>	1		1	3.29	81.76
	2		1	1.84	52.76
	3		1	2.57	79.25
	4		1	2.88	78.86
	1		2	2.48	75.95
	2		2	2.06	74.01
	3		2	2.33	72.44
	4		2	2.20	73.03
<b>Moyenne des deux coupes</b>				<b>4.91</b>	<b>147.02</b>
<b>Lorrainville</b>	1		1	2.14	59.03
	2		1	2.60	84.73
	3		1	2.45	74.96
	4		1	2.02	70.54



	1		2	1.99	57.80
	2		2	2.58	71.79
	3		2	2.37	59.72
	4		2	2.69	65.00
<b>Moyenne des deux coupes</b>				<b>4.18</b>	<b>113.44</b>
<b>Laverlochere</b>	1		1	3.05	83.19
	2		1	2.63	62.22
	3		1	2.89	79.98
	4		1	2.37	69.64
	1		2	2.54	75.60
	2		2	2.26	71.71
	3		2	1.72	55.63
	4		2	1.99	74.74
<b>Moyenne des deux coupes</b>				<b>4.86</b>	<b>143.18</b>
<b>Lorrainville</b>	1		1	2.65	83.38
	2		1	2.83	79.76
	3		1	2.43	65.99
	4		1	1.66	44.70
	1		2	1.61	61.34
	2		2	1.91	65.21
	3		2	2.24	92.19
	4		2	1.99	73.95
<b>Moyenne des deux coupes</b>				<b>4.33</b>	<b>141.63</b>
<b>Ste-Gertrude</b>	1	<b>K50</b>	1	1.19	29.95
	2		1	0.82	23.17
	3		1	1.51	40.62
	4		1	0.88	23.80
	1		2	2.55	77.11
	2		2	2.92	94.43
	3		2	2.28	66.29
	4		2	2.63	69.40
<b>Moyenne des deux coupes</b>				<b>3.70</b>	<b>106.19</b>
<b>Palmarolle</b>	1		1	2.23	66.54
	2		1	2.93	67.93
	3		1	1.83	52.79
	4		1	1.88	46.56
	1		2	3.01	87.85
	2		2	2.83	79.06
	3		2	2.35	68.14
	4		2	2.64	54.06
<b>Moyenne des deux coupes</b>				<b>4.93</b>	<b>130.73</b>
<b>Laverlochere</b>	1		1	2.78	79.97
	2		1	2.57	77.81
	3		1	2.26	70.02
	4		1	2.34	79.10
	1		2	1.58	55.22
	2		2	2.02	82.79
	3		2	1.69	67.60
	4		2	2.34	95.28
<b>Moyenne des deux coupes</b>				<b>4.39</b>	<b>151.95</b>
<b>Lorrainville</b>	1		1	2.97	92.06
	2		1	2.87	79.03
	3		1	2.21	74.61
	4		1	2.09	62.25

	1		2	1.66	67.49
	2		2	2.33	81.53
	3		2	1.50	63.69
	4		2	1.49	64.71
<b>Moyenne des deux coupes</b>				<b>4.28</b>	<b>146.34</b>
<b>Ste-Gertrude</b>	1		1	0.75	21.66
	2	<b>K100</b>	1	1.45	48.47
	3		1	0.83	23.99
	4		1	1.06	34.08
	1		2	2.60	86.63
	2		2	2.74	109.03
	3		2	2.66	82.30
	4		2	2.18	72.11
<b>Moyenne des deux coupes</b>				<b>3.57</b>	<b>119.57</b>
<b>Palmarolle</b>	1		1	2.16	68.99
	2		1	2.36	68.64
	3		1	1.80	50.91
	4		1	1.85	53.96
	1		2	2.52	79.70
	2		2	2.83	98.80
	3		2	2.66	66.52
	4		2	2.22	63.53
<b>Moyenne des deux coupes</b>				<b>4.60</b>	<b>137.76</b>
<b>Laverlochere</b>	1		1	3.74	103.55
	2		1	2.96	79.11
	3		1	2.20	67.84
	4		1	2.60	81.33
	1		2	2.86	92.68
	2		2	2.02	78.24
	3		2	1.96	75.49
	4		2	1.94	81.38
<b>Moyenne des deux coupes</b>				<b>5.07</b>	<b>164.90</b>
<b>Lorrainville</b>	1		1	1.62	49.51
	2		1	2.51	98.21
	3		1	1.98	60.25
	4		1	1.94	69.08
	1		2	1.79	81.85
	2		2	1.92	88.00
	3		2	1.99	81.46
	4		2	1.87	82.21
<b>Moyenne des deux coupes</b>				<b>3.90</b>	<b>152.64</b>
<b>Ste-Gertrude</b>	1		1	1.30	39.30
	2	<b>K150</b>	1	1.25	43.46
	3		1	1.82	56.13
	4		1	1.12	31.13
	1		2	2.26	91.73
	2		2	2.96	120.09
	3		2	2.35	74.54
	4		2	2.44	78.58
<b>Moyenne des deux coupes</b>				<b>3.88</b>	<b>133.74</b>
<b>Palmarolle</b>	1		1	3.03	78.70
	2		1	2.38	77.08
	3		1	1.79	59.71
	4		1	1.83	60.00

	1		2	3.58	101.15
	2		2	2.55	94.36
	3		2	1.88	65.50
	4		2	2.51	89.62
<b>Moyenne des deux coupes</b>				<b>4.89</b>	<b>156.53</b>
<b>Laverlochere</b>	1		1	3.31	100.35
	2		1	2.43	79.66
	3		1	2.40	76.55
	4		1	2.59	80.97
	1		2	2.16	54.34
	2		2	2.04	76.87
	3		2	1.67	67.93
	4		2	2.07	91.44
<b>Moyenne des deux coupes</b>				<b>4.67</b>	<b>157.03</b>
<b>Lorrainville</b>	1		1	1.30	47.26
	2		1	2.65	86.05
	3		1	2.02	70.94
	4		1	1.52	53.46
	1		2	1.61	77.30
	2		2	1.77	77.50
	3		2	1.29	50.68
	4		2	1.72	80.96
<b>Moyenne des deux coupes</b>				<b>3.47</b>	<b>136.04</b>
<b>Ste-Gertrude</b>	1		1	1.42	44.26
	2		1	1.15	33.02
	3	<b>K200</b>	1	1.69	52.76
	4		1	0.84	25.15
	1		2	2.69	76.67
	2		2	2.32	87.89
	3		2	3.03	89.01
	4		2	2.29	85.13
<b>Moyenne des deux coupes</b>				<b>3.85</b>	<b>123.47</b>
<b>Palmarolle</b>	1		1	3.13	103.80
	2		1	2.02	63.61
	3		1	1.90	57.77
	4		1	2.08	58.50
	1		2	3.35	102.58
	2		2	1.99	66.48
	3		2	1.90	51.48
	4		2	2.55	82.72
<b>Moyenne des deux coupes</b>				<b>4.73</b>	<b>146.73</b>
<b>Laverlochere</b>	1		1	3.72	116.66
	2		1	2.80	98.89
	3		1	1.97	71.72
	4		1	2.48	80.61
	1		2	1.98	73.27
	2		2	1.73	74.36
	3		2	1.47	64.70
	4		2	2.11	96.81
<b>Moyenne des deux coupes</b>				<b>4.57</b>	<b>169.25</b>
<b>Lorrainville</b>	1		1	2.83	106.22
	2		1	2.73	105.17
	3		1	1.90	62.92
	4		1	1.88	66.33

	1	2	2.03	87.49
	2	2	1.93	84.08
	3	2	2.36	100.60
	4	2	2.22	95.14
<b>Moyenne des deux coupes</b>			<b>4.47</b>	<b>176.99</b>