

Marianne Brassard

**Développement d'outils diagnostiques de la nutrition
azotée du maïs-grain pour une gestion optimale de
l'engrais azoté**

Mémoire présenté
à la faculté des études supérieures de l'Université Laval
dans le cadre du programme de maîtrise en Sols et environnement
pour l'obtention du grade de maître ès sciences (M. Sc.)

Département des sols et de génie agroalimentaire
Faculté des Sciences de l'Agriculture et de l'Alimentation
Université Laval
Québec

2007

RÉSUMÉ

Les engrais azotés sont essentiels pour atteindre des rendements élevés, mais ils peuvent causer des problèmes environnementaux s'ils ne sont pas prélevés par la plante. Des indicateurs du statut nutritif, tels que les indices de chlorophylle des feuilles (IC), le test de nitrates (NO_3) du sol et les indices de nutrition azotée (INA) calculés à partir d'une concentration critique en N (N_c) font partie des nouveaux outils diagnostiques à évaluer au Québec pour assurer une meilleure gestion de l'azote dans la production du maïs-grain. Nos objectifs sont de valider le modèle de concentration critique en N de Plénet et Lemaire (2000), d'étudier la relation entre l'IC et l'INA, ainsi que la relation entre la teneur en NO_3 du sol et l'INA.

Différentes doses de N (20 à 250 kg N ha⁻¹) ont été appliquées pendant deux saisons de croissance (2004-2005) sur six sites situés dans les régions de Québec et de la Montérégie. Des mesures de la biomasse aérienne, la teneur en N des feuilles, la chlorophylle et la teneur en NO_3 sur 0-15 cm ont été prises à sept ou huit occasions à des intervalles d'environ une semaine au cours de la saison de croissance.

Les résultats obtenus indiquent que la courbe de N critique (g N kg⁻¹ MS) suivante : $N_c = 34W^{-0.37}$ (W : biomasse aérienne; t MS ha⁻¹) proposée par Plénet et Lemaire (2000) en France est validée, puisqu'elle permet de distinguer les situations limitantes et non limitantes en N du maïs pour les conditions pédoclimatiques du Québec. Une relation quadratique positive a été obtenue entre l'IC et l'INA ($R^2 = 0,56$; $P < 0,001$) toutefois, cette relation semble varier selon les sites. Finalement, aucune relation positive significative n'a été observée entre la teneur en nitrates du sol et l'INA. Cependant, une accumulation de nitrates a été observée lorsque l'INA était plus élevé que 0,95.

AVANT-PROPOS

En tout premier lieu, je tiens à remercier mon directeur et ma co-directrice de recherche Dr. Léon-Étienne Parent et Dr. Noura Ziadi, ainsi que Dr. Gilles Bélanger, qui m'ont encouragée et conseillée tout au long du travail. Leur confiance, leur support, ainsi que leurs commentaires concernant ce mémoire m'ont beaucoup aidée dans mon cheminement.

Je voudrais aussi remercier tous les gens que j'ai eu la chance de côtoyer et qui m'ont aidée et encouragée autant au laboratoire que lors des travaux au champ. Je pense ici à toute l'équipe du Centre de recherche et de développement sur les sols et les grandes cultures d'Agriculture et Agroalimentaire Canada à Ste-Foy (Danielle Mongrain, Sylvie Michaud, Athyna Cambouris, Alain Larouche, Mario Deschênes, Frédéric Potvin, Louis Lefebvre et Lili Michaud), où s'est déroulé la majeure partie de mon projet, ainsi que l'équipe de Dr. Nicolas Tremblay du Centre de recherche et développement en horticulture de St-Jean-sur-Richelieu (Carl Bélec, Édith Fallon et Marcel Tétreault).

Aux producteurs (M. Éric Cantin de Sainte-Catherine de la Jacques-Cartier, M. Yvon Daigle de Saint-Louis-sur-Richelieu et MM. Yvon et Hugues Landry de Saint-Valentin) qui ont accepté de participer volontairement au projet en nous permettant d'utiliser leurs terres, merci pour votre excellente collaboration. Merci également à SynAgri et à Agriculture et Agroalimentaire Canada pour le financement de cette étude.

Finalement, merci à mes ami(e)s et ma famille qui m'ont aidée à persévérer grâce à leurs encouragements et à mon amoureux Dany pour sa compréhension et ses encouragements, qui furent très appréciés.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ.....	ii
AVANT-PROPOS	iii
TABLE DES MATIÈRES	iv
LISTE DES FIGURES.....	vi
LISTE DES TABLEAUX.....	viii
LISTE DES TABLEAUX.....	viii
1. INTRODUCTION GÉNÉRALE	10
2. HYPOTHÈSES	12
3. OBJECTIFS SPÉCIFIQUES	12
4. REVUE DE LITTÉRATURE	13
4.1. L'azote	13
4.1.1. Effet de l'azote sur le maïs.....	14
4.1.2. Dynamique de l'utilisation de l'azote par le maïs.....	15
4.2. Différents systèmes de diagnostic azoté	16
4.3. Le test de nitrates du sol	18
4.3.1. Présentation	18
4.3.2. Facteurs de variation du test de nitrates du sol	18
4.3.3. Perspectives de diagnostic.....	19
4.4. L'indice de nutrition azotée (INA)	22
4.4.1. Présentation	22
4.4.2. Détermination et validation de la courbe de la teneur en N critique.....	24
4.4.3. Influence de la physiologie de la culture, C3 vs C4.....	27
4.4.4. Avantages et inconvénients de l'INA	28
4.4.5. Perspectives de diagnostic.....	28
4.5. Le lecteur de chlorophylle (SPAD-502)	30
4.5.1. Présentation	30
4.5.2. Recommandations générales.....	31
4.5.3. Facteurs de variation de l'indice de chlorophylle	32
4.5.4. Perspectives de diagnostic.....	35
5. MATÉRIEL ET MÉTHODES	38
5.1. Sites expérimentaux	38
5.1.1. Caractéristiques générales.....	38
5.1.2. Données climatiques	40
5.2. Calendrier des activités	43
5.3. Traitements	43
5.4. Analyse des tissus végétaux	45
5.4.1. Indice de nutrition azotée (objectif 1)	45
5.4.2. Lectures de chlorophylle (objectif 2)	46
5.5. Analyse des sols (objectif 3)	47
5.6. Analyse statistique	47

5.6.1. Analyse de variance	47
5.6.2. Validation du modèle de Plénet et Lemaire (2000)	48
5.6.2. Analyse des relations entre variables	51
6. RÉSULTATS ET DISCUSSION.....	52
6.1. Modèle de la teneur critique en azote	52
6.1.1. Effet de la fertilisation azotée sur la biomasse et la teneur en N des plantes.....	52
6.1.2. Validation du modèle de la teneur critique en azote de Plénet et Lemaire.....	59
6.2. Indice de nutrition azotée (INA)	63
6.2.1. Effet de la fertilisation azotée sur l'indice de nutrition azotée.....	63
6.2.2. Relation entre le rendement relatif et l'indice de nutrition azotée.....	67
6.3. Indice de chlorophylle (IC)	71
6.3.1. Effet de la fertilisation azotée sur l'indice de chlorophylle	71
6.3.2. Effet du temps sur l'indice de chlorophylle	71
6.3.3. Relation entre les lectures de chlorophylle et la teneur en N des feuilles.....	76
6.3.4. Relation entre l'indice de chlorophylle et l'indice de nutrition azotée	77
6.3.5. Indice de saturation en chlorophylle	80
6.3.6. Indice de chlorophylle vs rendement relatif.....	83
6.4. Nitrates du sol	85
6.4.1. Effet de la fertilisation azotée sur la teneur en nitrates du sol	85
6.4.2. Teneur en nitrates du sol vs indice de nutrition azotée	85
6.4.3. Rendement relatif vs teneur en nitrates du sol	92
7. CONCLUSION	95
8. PERSPECTIVES.....	97
BIBLIOGRAPHIE	99

LISTE DES FIGURES

Figure 4.1. Cycle de l'azote (Adaptée de Tran et al., 1996(b)).....	14
Figure 4.2. Relation entre le rendement relatif et le test de N-NO ₃ du sol (Adaptée de Magdoff et al., 1990).....	20
Figure 4.3. Doses d'azote vs nitrates du sol pour (A) Blé (B) Orge (Adaptée de Isfan, 1995).	21
Figure 4.4. Fertilisation azotée selon les nitrates du sol (Adaptée de Kachanoski et Beauchamp, 1991).....	22
Figure 4.5. Principe de la courbe de la teneur en N critique (Adaptée de Gastal et Lemaire, 2001).	24
Figure 4.6. Concentration en N (%) en fonction de la biomasse (t MS ha ⁻¹) afin de déterminer la teneur en N critique. (+) Valeurs mesurées dans les différents traitements de fertilisation azotée (D1-D5) à une date donnée. (●) Points critiques calculés à cette date. (Adaptée de Justes et al., 1994).	25
Figure 4.7. Teneur en N vs biomasse aérienne des données satisfaisant les 2 critères définis. (+) Valeurs mesurées pour les différentes doses d'azote (D ₁ -D ₅) à chaque date. (●) Points critiques (N _c) calculés à chaque date. (—) Courbe critique (N _c = 5,35 W ^{-0,442}) (Adaptée de Justes et al., 1994).....	26
Figure 4.8. Validation de la courbe de la teneur en N critique du blé. (○), (Δ) Traitements où N était un facteur statistiquement limitant pour la croissance. (●), (▲) Traitements où N n'était pas un facteur statistiquement limitant pour la croissance. (—) Courbe de la teneur en N critique du blé. (—) Courbe de N _{min} et N _{max} (Adaptée de Justes et al., 1997).	27
Figure 4.9. Relation entre le rendement relatif et l'INA de deux cultivars de pommes de terre (R:Russet Burbank ; S:Shepody) avec irrigation (I) et sans irrigation (NI) (Adaptée de Bélanger et al., 2001b).....	29
Figure 4.10. Relation entre la lecture du SPAD et la concentration en N des feuilles de maïs au stade 5 ^{ième} et 6 ^{ième} feuille (Adaptée de Rashid et al., 2004).....	31
Figure 4.11. Utilisation du lecteur de chlorophylle sur une feuille de maïs.	31
Figure 4.12. Zone pour la prise de la lecture du chlorophyllomètre.	32
Figure 4.13. Variations saisonnières des lectures du chlorophyllomètre pour deux hybrides de maïs à quatre niveaux de fertilisation azotée (Adaptée de Schepers et al. 1992)....	33
Figure 4.14. Différents stades de croissance végétative du maïs-grain (Ministère de l'agriculture, de l'alimentation et des affaires rurales de l'Ontario, 2002).	34
Figure 4.15. Relation entre les lectures du chlorophyllomètre du maïs au stade 5-6 feuilles et la dose d'application maximale économique d'engrais (DAME) (Adaptée de Rashid et al., 2004).....	37
Figure 5.1. Précipitations mensuelles mesurées sur chaque site en 2004 et 2005 (Environnement Canada, 2001).	41
Figure 5.2. Températures moyennes mensuelles mesurées sur chaque site en 2004 et 2005 (Environnement Canada, 2001).	42
Figure 5.3. Exemple d'un plan d'échantillonnage de maïs sur les champs commerciaux en 2004.....	46
Figure 6.1. Validation du modèle de la teneur en azote (N) critique de Plénet et Lemaire (2000). Barre verticale : plus petite différence significative de la teneur en N. Barre horizontale : plus petite différence significative de la biomasse.....	59

Figure 6.2. Relation entre la biomasse aérienne et la dose d'azote appliquée (L'Acadie, 30 juillet 2004).	62
Figure 6.3. Relation entre le rendement relatif et l'indice de nutrition azotée moyen; les données proviennent des différents sites.	69
Figure 6.4. Relation entre l'indice de nutrition azotée moyen et le rendement relatif; les données proviennent des différents sites.	70
Figure 6.5. Indice de chlorophylle (IC) en fonction des UTM, exemple du site de L'Acadie en 2004.	72
Traitement de 20 kg N ha ⁻¹ .	72
Traitement de 73 kg N ha ⁻¹ .	72
Traitement de 125 kg N ha ⁻¹ .	72
Traitement de 178 kg N ha ⁻¹ .	72
Figure 6.6. Relation entre les lectures de chlorophylle et la teneur en N des feuilles au stade V8 à V10; données provenant de tous les sites.	77
Figure 6.7. Relation entre l'indice de nutrition azotée et l'indice de chlorophylle pour l'ensemble de la saison selon le site. Courbe du site de St-Basile 2004 -----, courbe du site de St-Louis 2005 _____, courbe pour l'ensemble des sites _____.	79
Figure 6.8. Relation entre l'indice de nutrition azotée et l'indice de chlorophylle au stade V8 à V10; données provenant de tous les sites.	80
Figure 6.9. Relation entre l'indice de chlorophylle absolu et l'indice de nutrition azotée pour les sites de St-Louis 2004-05.	82
Figure 6.10. Relation entre l'indice de saturation en chlorophylle et l'indice de nutrition azotée pour les sites de St-Louis 2004-05.	82
Figure 6.11. Relation entre l'indice de chlorophylle et le rendement relatif; données provenant de tous les sites.	83
Figure 6.12. Relation entre l'indice de nutrition azotée et la teneur en nitrates du sol à chaque site pour toute la saison.	91
Figure 6.13. Relation entre l'indice de nutrition azotée et la teneur en nitrates du sol en début de saison (stades V8 à V10).	92
Figure 6.14. Relation entre la teneur en nitrates du sol moyenne et le rendement relatif; données provenant de tous les sites.	94

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 4.1. Grille de fertilisation pour le maïs-grain (sans fumier) (Bélec et al., 2006) ...	35
Tableau 5.1. Localisation, texture de surface et précédents culturels des sites, saisons 2004-2005	39
Tableau 5.2. Caractéristiques physico-chimiques de la couche de surface des sites expérimentaux (0-20 cm)	39
Tableau 5.3. Calendrier des activités de champ 2004 et 2005	43
Tableau 5.4. Traitements expérimentaux pour la culture du maïs-grain chez les producteurs à St-Louis-sur-Richelieu, St-Basile de Portneuf et Ste-Catherine de la Jacques-Cartier	44
Tableau 5.5. Traitements expérimentaux pour la culture du maïs-grain à la ferme expérimentale de L'Acadie	45
Tableau 5.6. Décomposition des degrés de liberté de l'ANOVA	48
Tableau 5.7. Exemple de sortie SAS pour le LSD protégé $\alpha = 0,1$ et différents groupes formés.....	50
Tableau 6.1. Biomasses aériennes du maïs fertilisé avec différentes doses d'azote aux sites de la région de Portneuf (St-Basile, 2004 et Ste-Catherine, 2005)	53
Tableau 6.2. Biomasses aériennes du maïs fertilisé avec différentes doses d'azote aux sites de St-Louis (2004 et 2005).....	54
Tableau 6.3. Biomasses aériennes du maïs fertilisé avec différentes doses d'azote aux sites de la ferme expérimentale de L'Acadie (2004 et 2005)	55
Tableau 6.4. Concentration en azote du maïs fertilisé avec différentes doses d'azote aux sites de la région de Portneuf (St-Basile, 2004 et Ste-Catherine, 2005)	56
Tableau 6.5. Concentration en azote du maïs fertilisé avec différentes doses d'azote aux sites de St-Louis (2004 et 2005).....	57
Tableau 6.6. Concentration en azote du maïs fertilisé avec différentes doses d'azote aux sites de la ferme expérimentale de L'Acadie (2004 et 2005)	58
Tableau 6.7. Doses non limitantes utilisées pour la validation de la courbe de la teneur en N critique.....	62
Tableau 6.8. Doses limitantes utilisées pour la validation de la courbe de la teneur en N critique.....	63
Tableau 6.9. Indice de nutrition azotée (INA) du maïs fertilisé avec différentes doses d'azote aux sites de la région de Portneuf (St-Basile, 2004 et Ste-Catherine, 2005) ..	64
Tableau 6.10. Indice de nutrition azotée (INA) du maïs fertilisé avec différentes doses d'azote aux sites de St-Louis (2004 et 2005)	65
Tableau 6.11. Indice de nutrition azotée (INA) du maïs fertilisé avec différentes doses d'azote aux sites de la ferme expérimentale de L'Acadie (2004 et 2005).....	66
Tableau 6.12. Indice de nutrition azotée moyen et contrastes à chaque site pour toute la saison de croissance ¹	67
Tableau 6.13. Rendement relatif à chaque site et année (2004 et 2005).....	68
Tableau 6.14. Indice de nutrition azotée (INA) nécessaire pour obtenir différents rendements relatifs	70
Tableau 6.15. Estimation de la chlorophylle du maïs fertilisé avec différentes doses d'azote aux sites de la région de Portneuf (St-Basile, 2004 et Ste-Catherine, 2005)	73
Tableau 6.16. Estimation de la chlorophylle du maïs fertilisé avec différentes doses d'azote aux sites de St-Louis (2004 et 2005).....	74

Tableau 6.17. Estimation de la chlorophylle du maïs fertilisé avec différentes doses d'azote aux sites de la ferme expérimentale de L'Acadie (2004 et 2005)	75
Tableau 6.18. Indice de chlorophylle moyen et contrastes à chaque site pour toute la saison de croissance	76
Tableau 6.19. Estimation des lectures de chlorophylle des sites de la région de Portneuf (2004-2005).....	81
Tableau 6.20. Teneur en nitrates du sol (0-15 cm) fertilisé avec différentes doses d'azote aux sites de la région de Portneuf (St-Basile, 2004 et Ste-Catherine, 2005)	86
Tableau 6.21. Teneur en nitrates du sol (0-15 cm) fertilisé avec différentes doses d'azote aux sites de St-Louis (2004 et 2005).....	87
Tableau 6.22. Teneur en nitrates du sol (0-15 cm) fertilisé avec différentes doses d'azote aux sites de la ferme expérimentale de L'Acadie (2004 et 2005)	88
Tableau 6.23. Teneur en nitrates moyenne du sol à chaque site et contrastes pour toute la saison de croissance	89
Tableau 6.24. Teneur en nitrates critique pour chaque site.....	93

1. INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le maïs (*Zea mays* L.) est l'une des céréales les plus cultivées dans le monde. En effet, avec le blé (*Triticum aestivum* L.) et le riz (*Oryza sativa* L.), cette céréale contribue à plus de 75 % de toute la production des céréales sur la planète (Doucet, 2002). Au Québec, pour l'année 1999, la culture du maïs-grain occupait environ 21 % du territoire cultivé (360 000 ha) et elle se classait au premier rang dans la catégorie des céréales et des oléagineux. Une augmentation importante de cette culture a pu être observée, particulièrement entre les années 1976 (moins de 100 000 ha) et 2001 (plus de 435 000 ha ; Statistique Canada, 2001). Celle-ci est due en grande partie à la hausse de la production porcine, le maïs-grain constituant un aliment de consommation courante pour les porcs (Statistique Canada, 2001). De plus, la production d'éthanol pour le carburant pourrait stimuler la production de maïs au Québec dans les prochaines années (MDDEP, 2000).

L'azote (N) est l'élément pivot de la productivité des cultures. Ainsi, des déséquilibres en N peuvent affecter le rendement et la qualité des récoltes. Le maïs est une plante qui a des besoins élevés en azote pour atteindre de hauts rendements et satisfaire à ses exigences nutritionnelles. En effet, l'augmentation du rendement de cette espèce est directement attribuable à l'apport de N (Doucet, 2002). De ce fait, la fertilisation azotée peut devenir problématique si elle n'est pas effectuée de façon judicieuse car, pour atteindre des rendements élevés, de nombreux producteurs appliquent des doses de N supérieures à celles recommandées, préférant les pertes d'azote aux pertes de rendements (Bedekovick, 1987). En effet, une partie de l'azote ajouté ne sera pas utilisée par la plante si elle n'est pas appliquée au bon moment ou si elle excède les besoins de la culture, le coefficient d'utilisation de l'azote ajouté dépassant rarement 50 % (Isfan et al., 1995 ; Tran et al., 1997). L'azote résiduel sous forme de nitrates, qui sont très solubles, est entre autres perdu par lessivage et ruissellement et il entraîne la pollution des eaux de surface et souterraine (Doucet, 2002). Cette pollution par l'azote d'origine agricole est en croissance depuis 1981 (McRae et al., 2000) et entraîne différents problèmes, tel que l'eutrophisation. En plus de la contamination des cours d'eau, les nitrates peuvent aussi subir une dénitrification, qui est le passage des nitrates (NO_3) en azote atmosphérique (N_2) avec comme intermédiaire l'oxyde d'azote (NO) et/ou l'oxyde nitreux (N_2O), qui sont susceptibles de détruire la couche

d'ozone (Kowalenko, 2004). Le N_2O est aussi un gaz contribuant largement à l'effet de serre, puisqu'il possède un facteur de potentiel de réchauffement 310 fois supérieur au CO_2 (Environnement Canada, 2001). Finalement, les fertilisants minéraux azotés représentent un coût important. Ainsi, un apport excessif équivaut à une perte économique pour le producteur en plus de constituer un danger pour l'environnement.

Étant donné les nombreux problèmes reliés à la surfertilisation, il est important de développer des outils de diagnostic de la nutrition azotée pour la culture du maïs. Un diagnostic basé sur la plante et complémentaire à celui du sol s'avère indispensable pour mieux gérer cet élément et réduire les risques de pollution environnementale. Des études européennes ont permis de développer et valider un modèle permettant de déterminer la teneur critique en azote, laquelle correspond à la teneur minimum de N permettant d'obtenir la biomasse aérienne maximum. Toutefois, très peu d'études ont été faites en Amérique du Nord et plus particulièrement au Québec. Cette étude permettra donc de mieux comprendre le comportement de l'azote dans le sol et dans la plante selon le niveau de fertilisation azotée apporté et ainsi, de développer des outils de prise d'aide à la décision pour assurer une gestion rationnelle de la fertilisation azotée des cultures au Québec.

2. HYPOTHÈSES

Les trois hypothèses émises pour cette étude sont les suivantes :

1. Le N critique, basé sur la plante entière, permet d'estimer l'indice de nutrition azotée (INA) et ce dernier fournit un diagnostic fiable de la nutrition azotée chez le maïs.
2. Il existe un lien positif entre les lectures de chlorophylle des feuilles et l'indice de nutrition azotée.
3. Il existe un lien positif entre la teneur en nitrates du sol et l'indice de nutrition azotée.

3. OBJECTIFS SPÉCIFIQUES

L'objectif principal de cette recherche est de développer des méthodes de diagnostic azoté pour le maïs. Les objectifs spécifiques de l'étude sont les suivants :

1. Valider le modèle de Plénet et Lemaire (2000) qui décrit la teneur critique en azote (N critique) chez le maïs, ce qui permettra de calculer l'indice de nutrition azotée (INA) pour cette culture;
2. Établir la relation entre les lectures de chlorophylle des feuilles et l'indice de nutrition azotée et ainsi, déterminer un indice de chlorophylle critique sous lequel il serait nécessaire d'apporter de l'azote;
3. Établir la relation entre la teneur en nitrates du sol et l'indice de nutrition azotée et ainsi, déterminer une teneur critique en nitrates du sol sous laquelle il serait nécessaire d'apporter de l'azote.

4. REVUE DE LITTÉRATURE

4.1. L'azote

L'azote est un élément clé pour la nutrition de la plupart des plantes et il joue un rôle biochimique très important. Il s'agit d'un constituant des protéines, de plusieurs enzymes et vitamines, de la chlorophylle et des alcaloïdes (Doucet, 2002). Cependant, un excès d'azote peut aussi diminuer le rendement et la résistance aux maladies et aux insectes et augmenter l'incidence de la verse (Tran et al., 1996).

L'azote est présent dans le sol sous forme organique ou inorganique, où il subit plusieurs processus de transformation tels que la minéralisation, la nitrification, l'immobilisation et la dénitrification (Fig. 4.1). L'azote inorganique est aussi soumis à différents mécanismes de perte dans l'environnement tels que la volatilisation ammoniacale, la dénitrification, la perte par lessivage, ainsi que par érosion et ruissellement. Les deux formes d'azote qui sont assimilables par les plantes sont les formes ammoniacale (NH_4^+) et nitrique (NO_3^-) (Tran et al., 1996). Une fois absorbés, une grande partie des nitrates seront réduits en ammonium dans les racines ou dans les feuilles pour entrer dans les voies de synthèse des acides aminés et des protéines (Morot-Gaudry, 1997).

Peu importe l'engrais utilisé et la dose appliquée, il ne sera utilisé qu'à 35-55 % par la culture puisque d'autres processus de transformation ainsi que des pertes interviennent. Ces pertes d'azote entraînent plusieurs impacts néfastes pour l'environnement et sont d'autant plus importantes que la dose utilisée est grande. Les risques de pollution de l'environnement par l'azote sont plus importants dans les sols légers et dans les sols moins fertiles et augmentent avec les précipitations (Doucet, 2002).

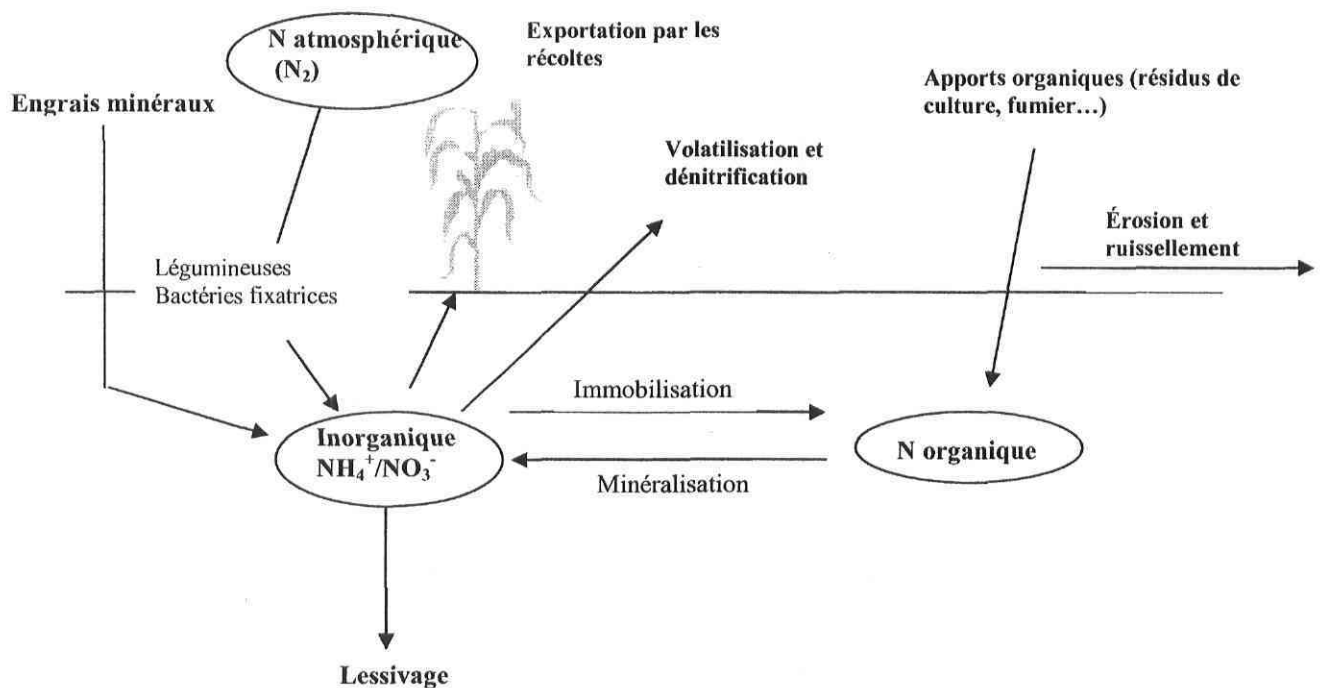


Figure 4.1. Cycle de l'azote (Adaptée de Tran et al., 1996(b)).

4.1.1. Effet de l'azote sur le maïs

L'azote a un effet marqué sur les rendements du maïs. Le Centre de référence en agriculture et en agroalimentaire du Québec (CRAAQ, 2003) recommande des apports entre 120 et 170 kg N ha⁻¹ pour la culture du maïs, selon la zone climatique et la texture du sol. En effet, Giroux et Tran (1995) ont démontré que, pour une zone climatique de 2300 unités thermiques maïs (UTM) comme la région de Québec, la dose optimale d'azote se situe aux environs de 120 kg N ha⁻¹ tandis que, pour une zone de 2700 UTM comme la région de St-Hyacinthe, une dose de 160 kg N ha⁻¹ convient généralement bien. De cette dose, on recommande d'appliquer de 20 à 50 kg ha⁻¹ en bande au semis (CRAAQ, 2003).

Bien qu'une augmentation de la dose d'azote permette généralement une augmentation de rendement, les doses excessives peuvent avoir des effets néfastes en augmentant l'acidité des sols et en rendant les plantes plus sensibles aux maladies et aux insectes, augmentant d'autant les besoins en pesticides (Isfan, 1995).

Ma et al. (2005), dans leur étude effectuée en Ontario, sont arrivés à la conclusion qu'un excès de N (250 kg ha⁻¹) provoquait une augmentation de la biomasse, mais avait un effet

négligeable sur le rendement en grain. Il n'y avait donc pas d'avantage à appliquer plus de 120 kg N ha⁻¹ puisqu'une dose plus élevée ne contribuait pas à augmenter le rendement en grains.

Différentes études ont été faites pour évaluer l'impact de la source d'azote (nitrate d'ammoniacal et urée) et du mode d'apport (fractionné ou non) sur le rendement du maïs en matière sèche et en grain. Ainsi, Zizka et Isfan (1990) ont démontré que la source d'azote n'influait pas significativement les rendements totaux en matière sèche, que l'épandage en bande au stade 7-8 feuilles ne présentait pas d'avantage au niveau du rendement par rapport à l'application à la volée au semis et que l'application fractionnée d'azote produisait un rendement semblable aux modes d'application unique des engrais. Isfan et al. (1995) et Tran et al. (1997) ont aussi démontré que le mode d'apport de l'azote (fractionné ou non, à la volée ou en bande) n'affectait pas significativement les rendements. D'un autre côté, certains travaux démontrent que le placement en bande en post-levée (fractionnement) augmente les rendements par rapport à l'application à la volée au semis (Stevenson et Baldwin, 1969 ; Fox et al., 1986). Il semble donc que l'effet du fractionnement sur le maïs soit très lié aux conditions expérimentales telles que le type de sols et les précipitations (Giroux et Tran, 1995).

De plus, une étude effectuée par le Ministère de l'agriculture, des pêcheries et de l'alimentation du Québec (MAPAQ) en 1992-1993 a démontré que la réduction de la fertilisation azotée n'a pas fait varier l'humidité du grain à la récolte ni sa valeur énergétique. Le taux de protéine brute quant à lui, tend à être très légèrement inférieur, 0,3 à 0,4 % en moyenne, lorsque les réductions de fertilisation azotée sont très grandes (Brunelle, 1994).

4.1.2. Dynamique de l'utilisation de l'azote par le maïs

Le maïs est l'une des cultures les plus productives et ce, en partie grâce à son métabolisme en C₄, qui lui permet d'assurer la photosynthèse quand ses stomates ne sont que partiellement ouverts. Toutefois, un apport important d'éléments nutritifs (N, P, K, Ca, Mg, etc.) est aussi nécessaire pour l'obtention de cette productivité remarquable. Selon les études de Liang et MacKenzie (1994) et de Tran (1995), les prélèvements totaux en azote par le maïs-grain pouvaient varier de 97 kg N ha⁻¹ dans les champs à faibles rendements à 208 kg N ha⁻¹ dans les champs à rendements élevés. De plus, afin de bien utiliser l'azote, le maïs a

besoin d'une humidité suffisante du sol, ainsi que de beaucoup de chaleur (Gamboa, 1978 ; Doucet, 2002). Une grande partie de l'azote ajouté ne sera donc pas utilisée par la plante si elle n'est pas appliquée au bon moment ou si elle excède les besoins de la culture. En effet, plusieurs études démontrent que le coefficient d'utilisation de l'azote ajouté dépasse rarement 50 % (Isfan et al. 1995 ; Tran et al. 1997 ; Simard et al., 2001). Selon Tran et al (1997), bien que le mode d'apport n'ait pas d'effet sur le rendement, il influence le coefficient d'utilisation de l'azote par la plante. Leurs résultats montrent que le coefficient d'utilisation de l'engrais appliqué à la volée au semis est généralement plus faible que celui des engrais appliqués en bande en post-levée et que l'engrais de démarrage appliqué en bande est celui ayant le plus fort coefficient d'utilisation. L'efficacité de l'absorption est aussi influencée par la dose d'azote appliquée. Plus cette dernière est élevée, plus le coefficient d'utilisation est faible. En effet, la quantité d'engrais non utilisée passait de 27 kg N ha⁻¹ à 103 kg N ha⁻¹ lorsque les doses augmentaient de 60 à 180 kg N ha⁻¹.

On peut distinguer trois phases d'absorption de l'azote chez le maïs. Dans la première, qui s'étend de la levée jusqu'au mois précédent l'apparition des soies, l'absorption s'effectue à un rythme très lent et la plante extrait seulement 8 % de ses besoins totaux. La deuxième phase a lieu pendant le mois précédent la sortie des soies et elle est caractérisée par une absorption assez rapide à la fin de laquelle le maïs a prélevé près de 60 % de ses besoins totaux. Finalement, la troisième phase se termine à la maturité physiologique de la plante et la vitesse de prélèvement diminue grandement par rapport à la deuxième phase. C'est pendant cette dernière phase que l'azote migre vers le grain (Gamboa, 1978).

Blackmer et al. (1989) ont déterminé que, durant les trois premières semaines après l'émergence, le maïs absorbait l'azote minéral du sol à un taux de moins de 0,5 kg ha⁻¹ jour⁻¹. Ainsi, un apport d'azote excessif en début de saison provoquait un plus grand risque de contamination de l'eau.

4.2. Différents systèmes de diagnostic azoté

De nombreux systèmes de diagnostic azoté, autant pour les sols que pour les plantes, ont été étudiés au cours des dernières années afin de permettre une amélioration de l'efficacité de la

fertilisation azotée des cultures; l'objectif principal étant d'optimiser la production tout en minimisant les pertes économiques et la pollution environnementale.

Parmi ces diagnostics, on retrouve le *Diagnosis and Recommendation Integrated System* (DRIS). La méthode du DRIS utilise des ratios entre les nutriments étudiés, plutôt que la concentration absolue et individuelle de chaque nutriment, pour l'interprétation de l'analyse des tissus. Ceci permet d'évaluer les interactions entre deux éléments et réduit l'effet des interactions, de la dilution ou de l'accumulation d'un nutriment dans le temps. Le DRIS exprime le résultat du diagnostic nutritionnel d'une plante par des indices, qui représentent l'effet de chaque nutriment dans la balance nutritionnelle de cette plante. Ces indices sont exprimés en valeurs positives ou négatives, lesquelles indiquent si les nutriments en question sont en excès ou en déficience. Plus la valeur de l'indice de chaque nutriment est près de zéro, plus la plante est proche d'une balance nutritionnelle adéquate (Walworth et Sumner, 1987). Toutefois, ce système peut entraîner des distorsions (Parent et Dafir, 1992).

Selon le même principe, on retrouve le *Compositional Nutrient Diagnosis* (CND), qui est en fait un ajustement du système bivarié du DRIS en un système de diagnostic multivarié, qui permet de tenir compte de l'interaction entre tous les éléments de l'analyse foliaire. Dans cette approche de Aitchison (1986), adaptée par Parent et Dafir (1992), la somme de tous les éléments forme un ensemble égal à 100 %, mais inclut une fraction résiduelle « R » constituée des composantes inconnues. Cette fraction résiduelle permet de conserver la structure de dépendance entre les éléments de l'analyse foliaire, tout en évitant les distorsions dues aux changements dans la concentration d'une des composantes du simplex. Elle est calculée par différence entre 100 % et la somme des composantes connues.

D'autres outils sont aussi disponibles afin d'évaluer le statut azoté de la plante. Les tests de nitrates du sol en présemis et en post-levée, l'indice de nutrition azotée (INA) et le lecteur de chlorophylle (SPAD) sont ceux qui ont été étudiés dans le cadre de ce projet et seront discutés plus en détails dans les points suivants.

4.3. Le test de nitrates du sol

4.3.1. Présentation

Les nitrates disponibles dans le sol au printemps sont très facilement et rapidement utilisables par les plantes. Ils pourraient donc servir à calculer les doses d'engrais azotés à appliquer chaque année et à réaliser des économies. Le test de nitrates du sol consiste à faire un échantillonnage sur les 20 ou 30 premiers cm de sol. Il est recommandé de faire au moins deux prélèvements par hectare (Brunelle, 1994) et de bien les mélanger pour avoir un échantillon représentatif du champ. Par la suite, le sol échantillonné doit être séché à l'air le plus rapidement possible et lorsqu'il est sec, la teneur en NO_3 doit être déterminée au laboratoire. La teneur en nitrate peut aussi être évaluée directement par le producteur à l'aide d'un ensemble comprenant des bandelettes imprégnées d'une substance chromogène. Cette substance se colore en fonction de la concentration en nitrate de la solution et il est par la suite possible de lire la mesure avec un réflectomètre de poche (Nitrachek 404). Toutefois, les valeurs inférieures à 5 ppm ne peuvent être lues par l'appareil (Tremblay et al., 2001). Le test de nitrates peut être fait à différents moments dans la saison, soit en présemis (Brunelle, 1994) ou en post-levée, quand le maïs a de 15 à 30 cm de hauteur (Magdoff et al., 1984, 1990).

4.3.2. Facteurs de variation du test de nitrates du sol

4.3.2.1. Culture précédente

La culture précédente influence la quantité de nitrates contenus dans le sol au printemps. En effet, le test de nitrates risque de sous-estimer la contribution azotée des légumineuses, pâturages ou prairies cultivés l'année précédente. Il n'est donc pas recommandé d'utiliser ce type de test après de telles cultures (Brunelle, 1994 ; Isfan, 1995).

4.3.2.2. Sites

La quantité de nitrates dans le sol dépend grandement des caractéristiques intrinsèques du site. Tout d'abord, la conformation du champ influence la teneur en nitrates. En effet, les conditions ne seront pas les mêmes dans le bas d'une pente que dans le haut ou encore sur les bordures des rigoles versus le centre du champ (Brunelle, 1994). De plus, un champ ayant une partie de texture argileuse et une autre plus sableuse peut être problématique. Il faut donc éviter ce type de situation à moins que l'on puisse échantillonner et fertiliser les deux parties

séparément. Il est donc conseillé de choisir un champ le plus uniforme possible, tant au niveau de la conformation que de la texture du sol. Bien entendu, le taux de lessivage et de dénitrification de l'azote va influencer directement la quantité de nitrates disponibles dans le sol. Ces réactions seront aussi favorisées ou diminuées en fonction de la température et des précipitations, qui varient entre les sites, mais aussi entre les années.

De plus, si le champ a reçu une application de fumier ou autres amendements organiques à l'automne, le test de nitrates n'est pas approprié. En effet, tout comme pour un retour de légumineuses, il risque de sous-estimer la contribution de l'amendement. Il est plutôt préférable de calculer la valeur fertilisante en fumier pour établir la fertilisation (Brunelle, 1994 ; Isfan, 1995).

4.3.3. Perspectives de diagnostic

Plusieurs études ont été faites afin de développer un modèle permettant l'utilisation du test de nitrates du sol comme outil diagnostique et ce, pour différentes cultures. Tout d'abord, Magdoff et al. (1984, 1990) ont évalué ce test en post-levée pour la culture du maïs sur plusieurs sites dans le nord-est des États-Unis. Ils ont effectué l'échantillonnage quand le maïs avait 15 à 30 cm de haut, ce qui leur a permis d'établir une corrélation entre la quantité de N-NO₃ présente au moment de l'échantillonnage et la probabilité d'obtenir une augmentation de rendement avec un ajout d'azote (Fig. 4.2). Ils ont établi un intervalle de teneurs critiques, de 20 à 30 mg N-NO₃ kg⁻¹ de sol, au-dessus duquel la probabilité d'obtenir une augmentation de rendement en effectuant une fertilisation supplémentaire était faible.

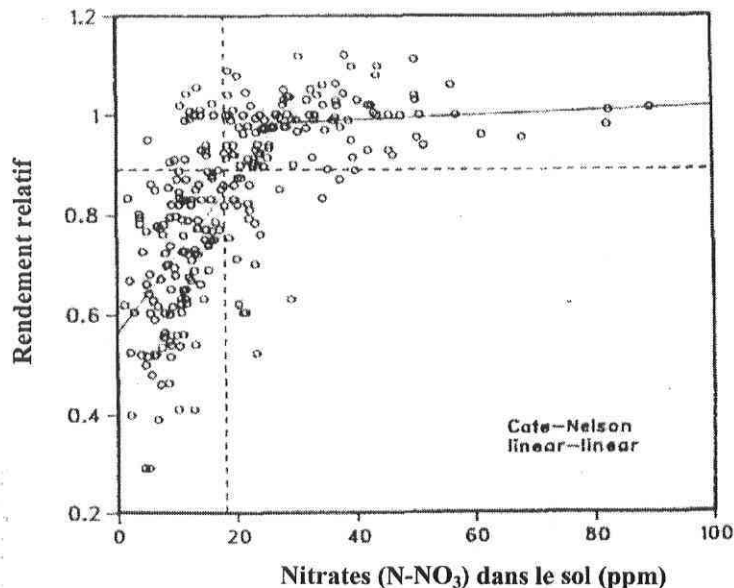


Figure 4.2. Relation entre le rendement relatif et le test de N-NO_3 du sol (Adaptée de Magdoff et al., 1990).

Ce test, s'il est effectué après le semis, permet une meilleure précision pour séparer les sites ayant des probabilités de réponse à une application supplémentaire de N. Toutefois, ceci implique des échantillonnages de sol supplémentaires à des moments différents de ceux effectués normalement à l'automne ou avant le semis au printemps. Il est aussi essentiel d'avoir les résultats d'analyse rapidement puisque le temps disponible entre l'échantillonnage et la période optimale pour la deuxième fertilisation est limitée (Magdoff et al., 1984, 1990).

Bélangier et al. (2001a) ont aussi évalué le test de nitrates du sol en post-levée pour la culture de la pomme de terre (*Solanum tuberosum* L.) au Nouveau-Brunswick et ont obtenu une bonne corrélation entre la teneur en nitrates du sol en milieu de saison et le rendement relatif. Ils suggèrent une teneur critique de $80 \text{ mg N-NO}_3 \text{ kg}^{-1}$ sol au-dessus de laquelle une application additionnelle d'azote n'est pas requise.

Pour ce qui est du test en présemis, Isfan (1995), en se basant sur plusieurs années d'étude et différentes séries de sol, a développé deux formules pour la culture du blé et de l'orge (*Hordeum vulgare* L. ; Fig. 4.3) au Québec. Ces formules permettent de déterminer la dose d'azote à appliquer en fonction de la quantité de nitrates (N-NO_3) disponible dans la couche

de 0-20 cm du sol au printemps. L'une des formules a été obtenue avec les doses qui correspondent aux rendements maximaux (doses maximales) tandis que l'autre a été formulée pour un rendement de 95 % du rendement maximal (doses minimales). Les doses d'engrais azotés à appliquer diminuent lorsque la teneur en nitrates du sol est élevée. À l'aide de ces formules, l'auteur a démontré qu'il est possible de réduire la dose d'azote d'environ 20 à 30 % en moyenne par rapport aux recommandations actuelles.

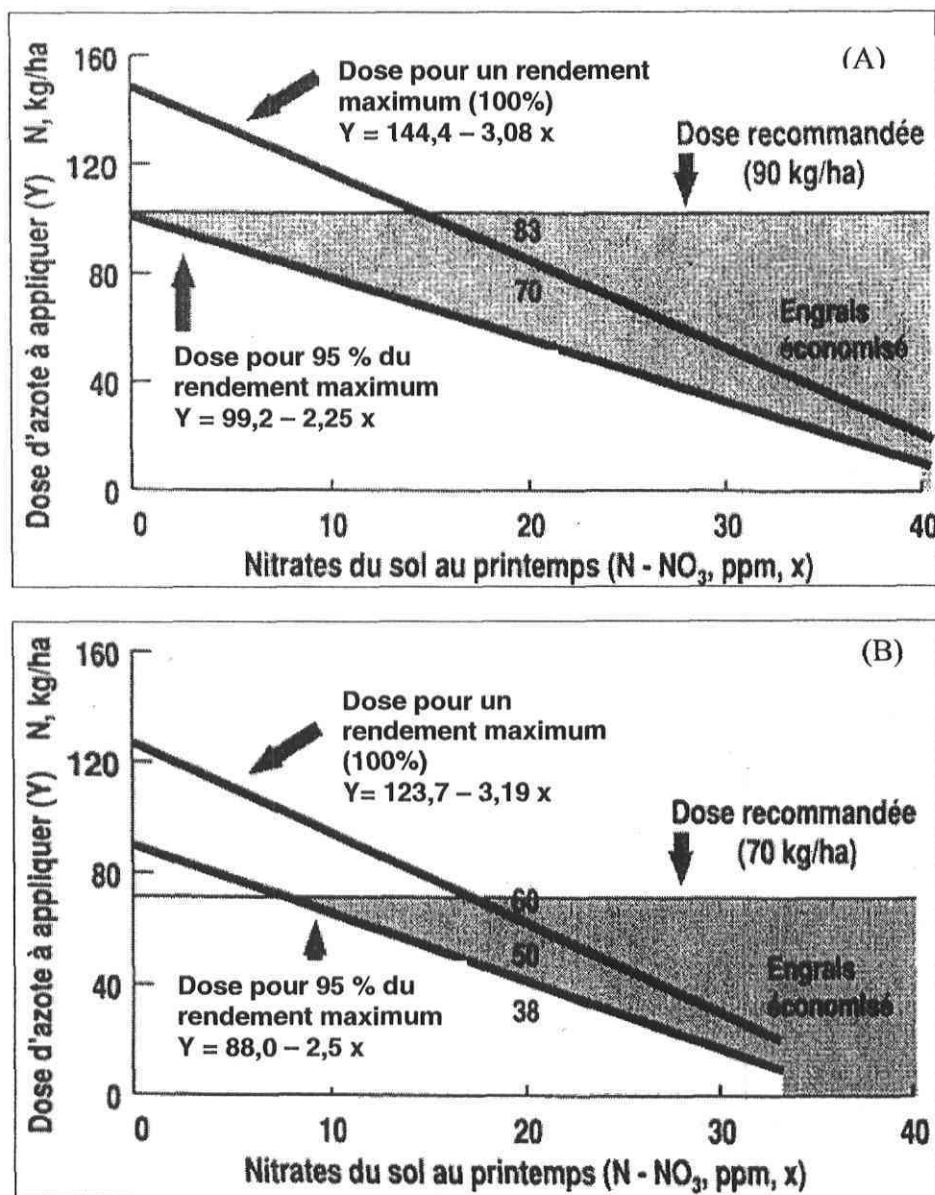


Figure 4.3. Doses d'azote vs nitrates du sol pour (A) Blé (B) Orge (Adaptée de Isfan, 1995).

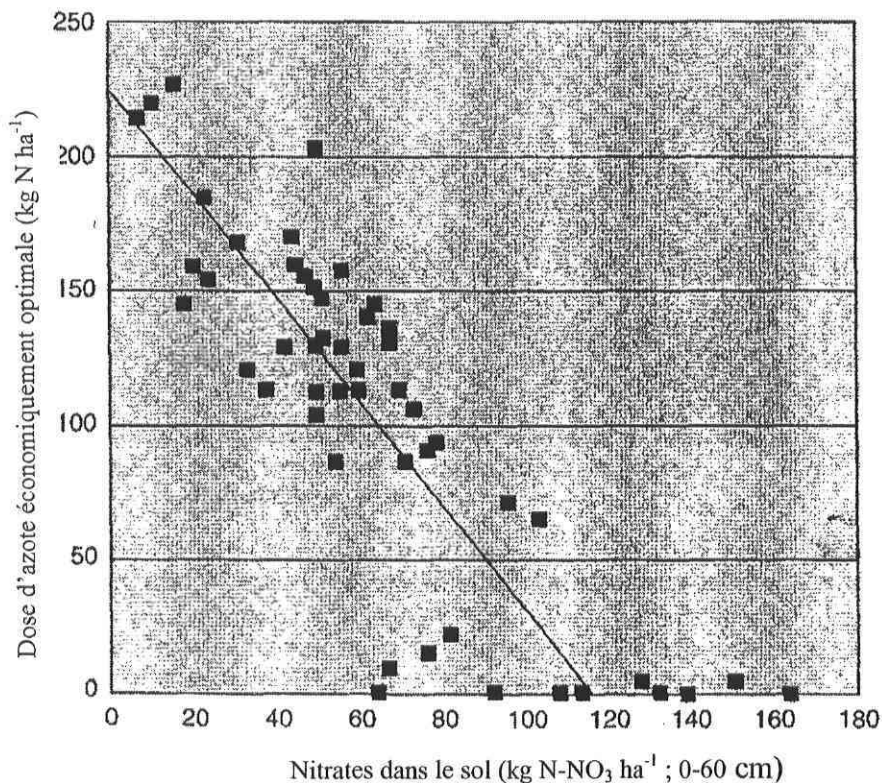


Figure 4.4. Fertilisation azotée selon les nitrates du sol (Adaptée de Kachanoski et Beauchamp, 1991)

Une autre étude réalisée en Ontario par Kachanoski et Beauchamp (1991) a permis d'établir une corrélation entre la teneur en nitrate du sol sur 60 cm en présemis et le taux d'application de N économique pour le maïs (Fig. 4.4). Selon Brunelle (1994), cette courbe peut être utilisée par les producteurs québécois.

Toutefois, dans une étude effectuée au Nouveau-Brunswick sur la pomme de terre, Bélanger et al. (2001a) ont conclu que la teneur en nitrates du sol avant la plantation n'est pas un critère adéquat pour déterminer précisément les besoins en N de cette culture. Les mêmes conclusions ont été obtenus pour le blé de printemps (Bélanger et al. 1998).

4.4. L'indice de nutrition azotée (INA)

4.4.1. Présentation

L'indice de nutrition azotée est un paramètre permettant de caractériser le niveau de nutrition azotée d'une culture et est défini par l'équation suivante :

$$\text{INA} = [\text{N}] \text{ mesurée} / [\text{N}] \text{ critique} \quad (1)$$

où $[N]$ mesurée est la concentration d'azote mesurée dans la biomasse aérienne totale et $[N]$ critique est la concentration en azote minimale de la plante permettant une croissance maximale. L'INA est donc un outil utile puisqu'il permet de déterminer si la nutrition azotée de la plante est optimale ($INA = 1,0$), limitante ($INA < 1,0$) ou en excès ($INA > 1,0$).

Afin de calculer l'INA, il est tout d'abord nécessaire d'établir une teneur en azote critique dans la plante tout au long de la saison de croissance. Cette teneur critique est basée sur la courbe de dilution de N définie par Lemaire et Salette (1984). En effet, la teneur en azote diminue avec l'augmentation de la biomasse et ce, d'une façon non linéaire (Lemaire et Salette, 1984 ; Greenwood et al., 1990 ; Bélanger et al., 2001b). La dilution de l'azote dans la plante est due à deux facteurs. Tout d'abord, le feuillage inférieur ombragé par le feuillage supérieur contient moins d'azote que ce dernier et la proportion de feuillage ombragé augmente avec l'augmentation de la biomasse. Deuxièmement, le ratio feuille:tige diminue tout au long de la croissance des plantes. La teneur en N étant plus élevée dans les feuilles que dans les tiges, on observe le phénomène de dilution avec l'augmentation de la biomasse (Lemaire et Chartier, 1992). Cette diminution de la teneur en N peut être décrite par la fonction allométrique suivante :

$$N = aW^{-b} \quad (2)$$

où "N" est la concentration en azote en g de N par kg de matière sèche (MS), "W" est la biomasse de la culture en tonne de MS par hectare, "a" correspond à la teneur en N pour une biomasse de 1 tonne de MS par hectare et "b" est le coefficient de dilution de N dans la plante (Justes et al., 1994 ; Gastal et Lemaire, 2001 ; Herrmann et Taube, 2004). En conditions non limitantes en N, cette relation permet de décrire le N critique (N_c), qui est défini comme étant la teneur en N minimale à laquelle la croissance maximale est observée (Justes et al., 1994 ; Plénet et Lemaire, 2000 ; Bélanger et al., 2001b ; Gastal et Lemaire, 2001). Il est donc possible de définir une courbe de la teneur critique en N en fonction du niveau d'accumulation de la biomasse (Justes et al., 1994). Celle-ci servira de référence pour calculer l'INA (Fig. 4.5) et déterminer si la nutrition azotée de la culture est en excès, optimale ou en déficit et ce, peu importe l'environnement ou le stade de croissance, en autant que la biomasse soit supérieure ou égale à 1 tonne MS ha⁻¹ (Gastal et Lemaire, 2001).

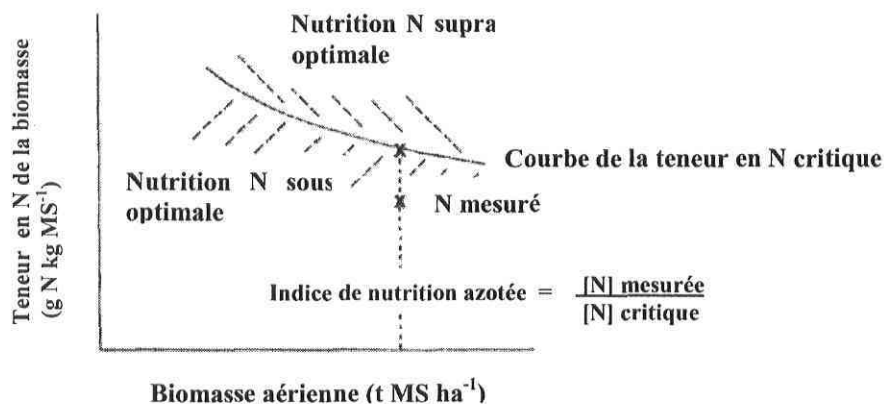


Figure 4.5. Principe de la courbe de la teneur en N critique (Adaptée de Gastal et Lemaire, 2001).

4.4.2. Détermination et validation de la courbe de la teneur en N critique

4.4.2.1. Détermination des teneurs critiques en N

Deux méthodes sont possibles afin d'établir la courbe de la teneur en N critique. La première méthode est celle utilisée par Greenwood et al. (1990). Ceux-ci ont effectué le test du LSD protégé, pour chaque site et chaque date d'échantillonnage, afin de déterminer quelle dose d'azote permettait l'obtention de la plus grande biomasse significativement différente des autres. Cette façon de faire leur permettait de déterminer la dose non limitante pour la croissance des plantes. Dans le cas où plusieurs doses étaient considérées comme étant non limitantes, c'est-à-dire que chacune des doses permettait l'obtention de biomasses non significativement différentes les unes des autres, la plus petite dose était choisie. La biomasse et la teneur en azote associées à chaque dose choisie ont donc servi à déterminer la courbe de la teneur en N critique.

Une deuxième méthode, plus récente et plus précise, a été élaborée par Justes et al. en 1994. À chaque date d'échantillonnage et sur chaque site, la biomasse aérienne sèche (W) et la concentration en N ($[N]$) sont comparées pour différents niveaux de fertilisation azotée ($n = 3, 4$ ou 5). Le test du LSD protégé à un niveau de probabilité alpha de 0,10 est effectué pour chaque date et chaque site afin de déterminer les différences significatives entre les moyennes aux différentes doses de N et ce, pour la biomasse et pour la teneur en N. Deux cas peuvent être distingués dépendamment de la position des points «n» (Fig. 4.6 A et B). Chaque série de points doit satisfaire les deux critères suivants (cas 1 ou cas 2) de façon significative au sens statistique. Cette méthode nécessite un très grand nombre de données

expérimentales puisque seulement les données des dates d'échantillonnage répondant aux deux critères suivants sont retenues pour établir la courbe.

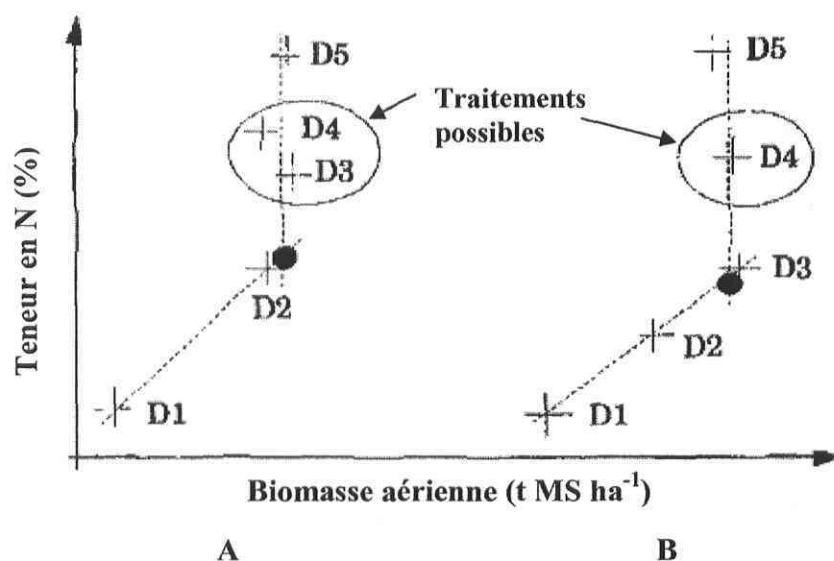


Figure 4.6. Concentration en N (%) en fonction de la biomasse ($t MS ha^{-1}$) afin de déterminer la teneur en N critique. (+) Valeurs mesurées dans les différents traitements de fertilisation azotée (D1-D5) à une date donnée. (•) Points critiques calculés à cette date. (Adaptée de Justes et al., 1994).

1^{er} cas (Fig. 4.6A)

Critère 1 : $W_1 < W_2 = \dots = W_n$ (si $n = 3, 4$ ou 5)

Critère 2 : $N_1 < N_2 \leq \dots < N_n$

2^{ème} cas (Fig. 4.6B)

Critère 1 : $W_1 < W_2 < W_3 = \dots = W_n$ (si $n = 4$ ou 5)

Critère 2 : $N_1 < N_2 < N_3 \leq \dots < N_n$

Pour chaque date d'échantillonnage, la variation de la concentration en N vs la biomasse sèche est composée d'une relation bilinéaire composée d'une droite oblique qui relie les doses entre lesquelles il y a une augmentation significative de la biomasse et de la teneur en N. La régression est effectuée de façon à minimiser la somme des carrés de l'erreur. Dans le premier cas, cette ligne passe par les points D_1 et D_2 et dans le second cas par les points D_1 , D_2 et D_3 . La deuxième droite est une ligne verticale correspondant à une augmentation de la teneur en N sans augmentation significative de la biomasse. L'abscisse à l'origine est égale à la moyenne des abscisses des points D_2 à D_n dans le premier cas et de D_3 à D_n dans le second cas. Dans les deux cas, la concentration critique en N correspond à l'ordonnée de

l'intersection des droites oblique et verticale. Pour les valeurs de biomasses inférieures à 1 tonne de MS ha⁻¹, Justes et al. (1994) ont déterminé une teneur en azote fixe, la courbe est donc valide pour les biomasses supérieures à 1 tonne de MS ha⁻¹ uniquement (Fig. 4.7)

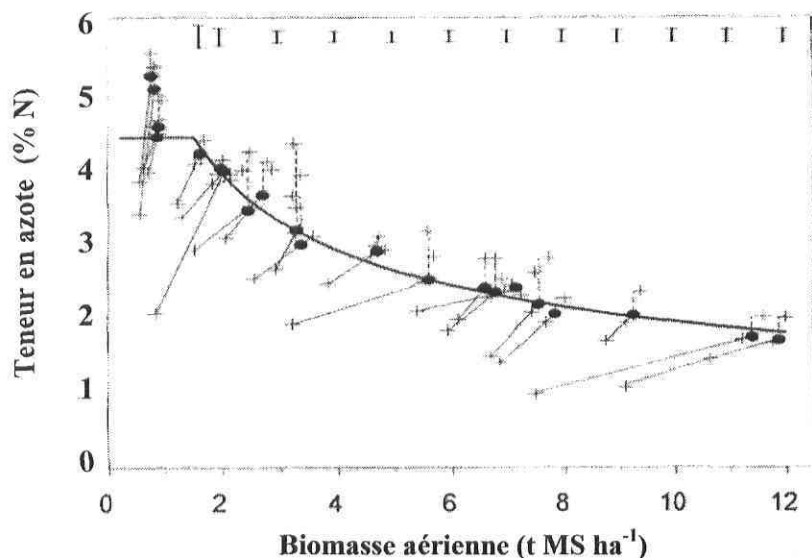


Figure 4.7. Teneur en N vs biomasse aérienne des données satisfaisant les 2 critères définis. (+) Valeurs mesurées pour les différentes doses d'azote (D₁-D₅) à chaque date. (●) Points critiques (Nc) calculés à chaque date. (—) Courbe critique ($N_c = 5,35 W^{-0,442}$) (Adaptée de Justes et al., 1994).

4.4.2.2. Validation de la courbe

Afin de valider la courbe établie précédemment, les situations n'ayant pas été retenues pour établir la courbe sont utilisées. Les traitements limitants et non limitants sont donc déterminés de la façon suivante : un traitement est considéré comme limitant en N quand sa biomasse est significativement inférieure ($P < 0,10$) à la biomasse du traitement ayant reçu la dose de fertilisant immédiatement supérieure. Les traitements sont considérés comme non limitants en N lorsque leurs biomasses sont statistiquement égales ($P > 0,90$) malgré le fait qu'ils aient reçu des doses différentes d'azote. Tout comme pour l'établissement de la courbe, les points ayant des biomasses inférieures à 1 tonne de MS ne sont pas considérés pour la validation. Justes et al. (1994) ont sélectionné 104 points limitants et 141 non limitants, ce qui leur a permis de valider la courbe qu'ils avaient établie pour le blé (Fig. 4.8).

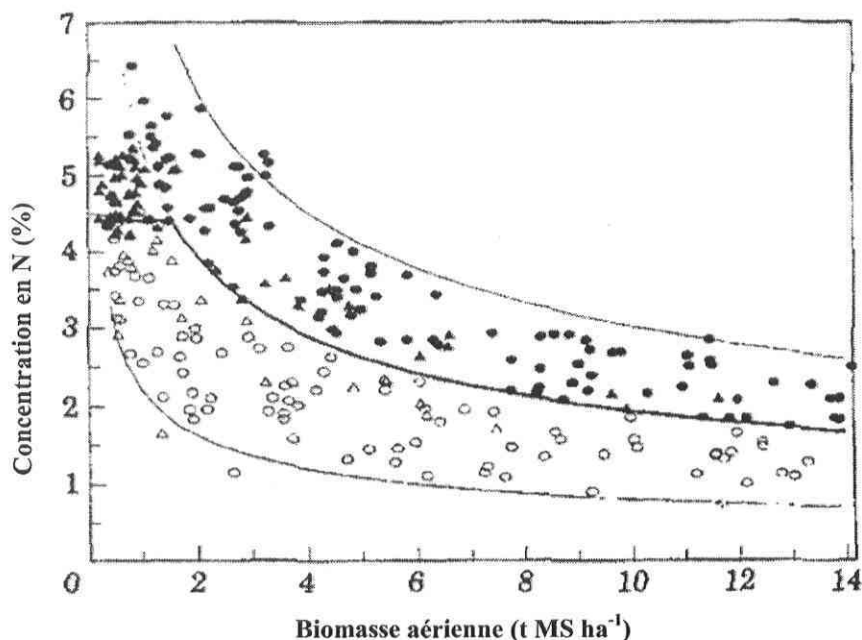


Figure 4.8. Validation de la courbe de la teneur en N critique du blé. (○), (Δ) Traitements où N était un facteur statistiquement limitant pour la croissance. (●), (▲) Traitements où N n'était pas un facteur statistiquement limitant pour la croissance. (—) Courbe de la teneur en N critique du blé. (---) Courbe de N_{\min} et N_{\max} (Adaptée de Justes et al., 1997).

4.4.3. Influence de la physiologie de la culture, C3 vs C4

Plusieurs études effectuées sur différentes cultures ont déjà démontré que la teneur en N de la biomasse aérienne diminuait avec une augmentation de cette même biomasse (Justes et al., 1994 ; Plénet et Lemaire, 2000). Toutefois, la dilution n'est pas la même pour chaque culture. En effet, selon Greenwood et al. (1990), il existe une distinction claire entre les cultures ayant un métabolisme C3 et C4. Ils ont donc défini deux équations soit :

$$\text{Pour les plantes C3 : } N_c = 56,97 W^{-0,5} \quad (3)$$

$$\text{Pour les plantes C4 : } N_c = 40,96 W^{-0,5} \quad (4)$$

Leurs résultats démontrent que les plantes C4 utilisent l'azote de manière plus efficace que les plantes C3. Ainsi, pour une biomasse donnée, la teneur en N des C4 est inférieure à celle des C3. En effet, la différence observée dans la valeur du coefficient "a" pour les deux types de cultures indique que les cultures en C4 requièrent seulement 72 % de l'azote requis par les C3 quand elles ont une biomasse aérienne équivalente. Cette différence serait attribuable à la voie de photosynthèse plus efficace des C4.

4.4.4. Avantages et inconvénients de l'INA

4.4.4.1. Avantages

L'INA comporte plusieurs avantages pour un bon système de diagnostic. Tout d'abord, Justes et al. (1994) ainsi que Herrmann et Taube (2004) ont déterminé que la vitesse de croissance, la densité de semis, le cultivar et les conditions pédoclimatiques n'influençaient pas la concentration de N critique dans le blé d'hiver et le maïs. Ainsi, peu importe les conditions présentes, on est assuré de la fiabilité du diagnostic. Un autre avantage de la courbe de N critique est qu'elle détecte autant les déficiences que les excès (Herrmann et Taube, 2004), ce qui permet, non seulement une application suffisante d'azote, mais aussi d'éviter les doses trop élevées, qui augmentent les risques de pertes dans l'environnement.

4.4.4.2. Inconvénients

Cette méthode comporte toutefois quelques inconvénients. En effet, l'équation de la courbe n'est pas valide pour des biomasses \leq à 1 t ha^{-1} puisque la valeur de N critique est alors constante (Justes et al. 1994 ; Plénet et Lemaire, 2000 ; Herrmann et Taube, 2004). De plus, il s'agit d'une méthode destructive et qui demande beaucoup de temps aux producteurs pour l'échantillonnage. Le temps d'analyse en laboratoire est aussi généralement assez long, tandis que le temps disponible pour apporter la deuxième fertilisation est limité, ce qui rend difficile son utilisation (Lemaire et al., 1997).

4.4.5. Perspectives de diagnostic

L'avantage majeur de cet outil diagnostic est la très faible variabilité de la courbe de la teneur critique en N et ce, malgré des conditions pédoclimatiques ou des cultivars différents. Ceci permet donc de l'utiliser peu importe les conditions présentes. Plénet et Lemaire (2000) ont déterminé une courbe de dilution de l'azote pour le maïs en France. Selon ces auteurs, le N_c est égal à 34,0 lorsque la biomasse est égale ou inférieure à 1 t ha^{-1} et l'équation de la courbe est : $N_c = 34,0 W^{-0,37}$, pour une biomasse située entre 1 et 22 t ha^{-1} . La relation qu'ils ont démontrée entre le N_c et la biomasse permet donc de calculer un INA pour le maïs, lequel fournit un indicateur du statut azoté dans un champ et ce, à chaque stade de croissance, afin d'améliorer la gestion de la fertilisation azotée dans la culture du maïs.

Dans une étude plus récente, Herrmann et Taube (2004) ont aussi déterminé une courbe de dilution de l'azote pour le maïs, mais cette fois en Allemagne. L'équation de leur courbe, très semblable à celle établie par Plénet et Lemaire (2000), est : $N_c = 34,12 W^{-0,391}$. Herrmann et Taube (2004) ont démontré que cette équation était valide autant pour la fertilisation minérale que pour la fertilisation organique.

De nombreux chercheurs dans plusieurs pays ont contribué à développer ce modèle dans différentes cultures, entre autres pour le riz (Cui et al., 2002), la tomate (*Lycopersicon Lycopersicum* Kar. ; Tei et al., 2002 ; Fontes et Ronchi, 2002) et le chou (*Brassica oleracea* L.), la carotte (*Daucus Carota* L.) et les oignons (*Allium Cepa* L. ; Westerveld et al., 2003). En Amérique du Nord, ce modèle a été validé pour la fléole des prés (*Phleum pratense* L.) et la pomme de terre (Bélanger et Gastal, 2000 ; Bélanger et al., 2001b).

Afin de s'assurer que l'INA n'est pas uniquement valable pour l'obtention de la croissance végétale maximale mais qu'il permet aussi l'obtention du rendement maximum, il est possible de mettre l'INA calculé en relation avec le rendement relatif, tel que démontré ci-dessous par Bélanger et al. (2001b) pour la pomme de terre (Fig. 4.9).

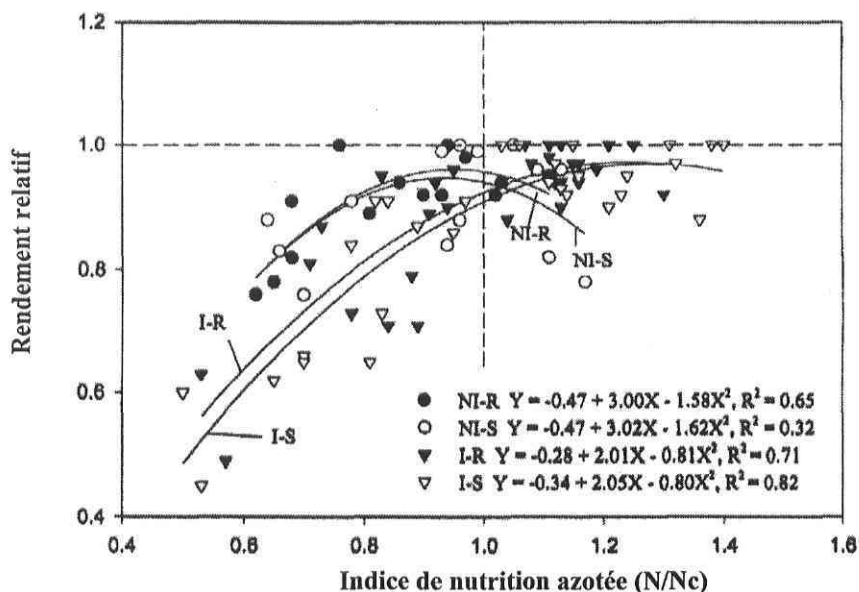


Figure 4.9. Relation entre le rendement relatif et l'INA de deux cultivars de pommes de terre (R: Russet Burbank ; S: Shepody) avec irrigation (I) et sans irrigation (NI) (Adaptée de Bélanger et al., 2001b).

Toutefois, encore aucune étude n'a été effectuée pour valider les courbes de Plénet et Lemaire (2000) et Herrmann et Taube (2004) pour le maïs dans les conditions

pédoclimatiques présentes en Amérique du Nord. De plus, aucune étude n'a mis en relation le rendement relatif avec l'indice de nutrition azoté pour la culture du maïs-grain dans ces mêmes conditions.

4.5. Le lecteur de chlorophylle (SPAD-502)

4.5.1. Présentation

Le lecteur de chlorophylle est un appareil qui permet d'estimer la teneur en chlorophylle dans la feuille. Celui-ci mesure la quantité de lumière passant à travers les feuilles et interprète les données concernant les propriétés de la chlorophylle et le spectre électromagnétique. Pour ce faire, il suffit de pincer une feuille avec l'appareil. Celui-ci envoie alors deux rayonnements de longueurs d'onde différentes qui traversent la feuille. L'un de ces rayonnements (430 nm) est absorbé par la chlorophylle, proportionnellement à sa teneur dans la feuille, tandis que l'autre (750 nm) est très peu absorbé, et sert plutôt de référence interne, afin de compenser pour l'absorbance non-chlorophyllienne liée aux parois cellulaires et à la teneur en eau de la feuille (Dwyer et al., 1994 ; Waskom et al., 1996 ; Shapiro, 1999). Le ratio entre ces deux longueurs d'onde, en plus du ratio déterminé sans feuille, est mesuré par l'appareil. La lecture obtenue est donc un indice de la teneur en chlorophylle (Piekielek et Fox, 1992). Or, puisque la teneur en chlorophylle est proportionnelle à la teneur en azote dans la feuille (Fig. 4.10), il est possible d'évaluer la concentration en N de la feuille et ce, rapidement et sans détruire la culture (Piekielek et Fox, 1992 ; Shapiro, 1999).

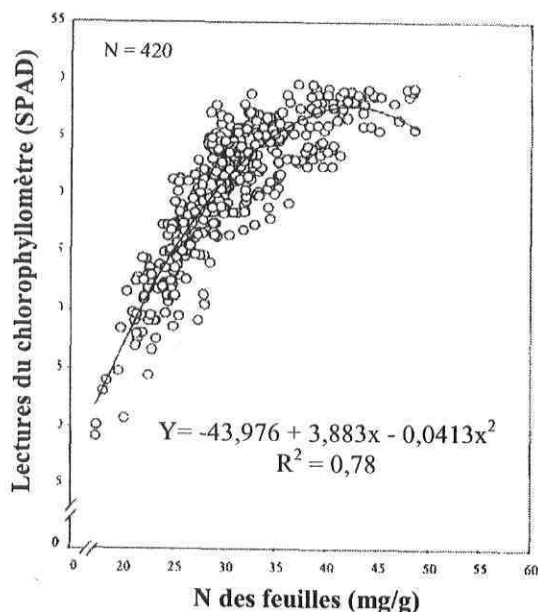


Figure 4.10. Relation entre la lecture du SPAD et la concentration en N des feuilles de maïs au stade 5^{ème} et 6^{ème} feuille (Adaptée de Rashid et al., 2004).

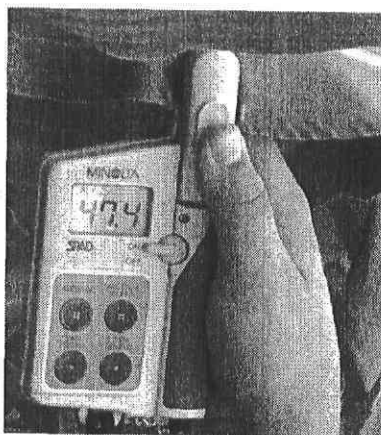


Figure 4.11. Utilisation du lecteur de chlorophylle sur une feuille de maïs.

Un appareil fréquemment utilisé pour prendre des lectures de chlorophylle est le SPAD-502 (Fig. 4.11) de la Minolta Corporation (Ramsey, New Jersey). L'échelle de mesure de cet appareil est sans unité et peut varier de 0 à 80, avec les valeurs élevées correspondant à des feuilles d'un vert plus foncé (Dwyer et al., 1994).

4.5.2. Recommandations générales

Plusieurs auteurs affirment que la lecture doit être prise sur la dernière feuille complètement déroulée et ligulée, lorsque la plante est au stade végétatif, et sur la feuille de l'épi principal à

l'apparition des soies (Waskom et al., 1996 ; Diker et al., 1999). Les lectures sont prises à un point situé à distance égale entre le bout de la feuille et le collet et à mi-chemin entre la nervure et la marge de la feuille (Fig. 4.12) (Waskom et al., 1996 ; Diker et al., 1999). Le nombre de lectures prises varie grandement entre les différents auteurs. Schepers et al. (1992) et Shapiro (1999) effectuent des lectures sur 30 plantes différents par parcelle, tandis que Rashid et al. (2004) prennent plutôt 40 lectures réparties sur 10 plantes.

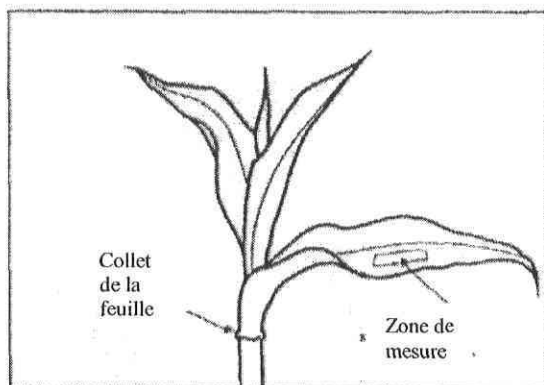


Figure 4.12. Zone pour la prise de la lecture du chlorophyllomètre.

Les mesures sur des feuilles abîmées, jaunes ou anormales devraient être évitées. De plus, la feuille échantillonnée devrait être exempte de poussière, de résidus de pesticides et d'eau puisque ces produits causent des interférences. La nervure centrale doit aussi être évitée afin de ne pas surestimer la lecture (Schepers et al., 1992 ; Tremblay et al., 2001).

4.5.3. Facteurs de variation de l'indice de chlorophylle

4.5.3.1. Cultivars utilisés

Schepers et al. (1992) ainsi que Bullock et Anderson (1998) ont observé des variations significatives des lectures de chlorophylle en fonction des cultivars utilisés, ce qui démontre clairement que les différences génétiques entre les cultivars affectent la coloration verte. Dans une autre étude effectuée par Waskom et al. (1996), les lectures du SPAD-502 variaient significativement entre les dix différents hybrides sous des conditions de croissance identiques et ce, à chacun des trois stades de croissance mesurés.

4.5.3.2. Conditions du milieu (Site)

Waskom et al. (1996) ont étudié l'effet du site sur les lectures de chlorophylle et ont obtenu une différence significative entre les deux sites avec un niveau alpha de 0,10 à deux des trois

stades de croissance mesurés. Shepers et al. (1992) et Bullock et Anderson (1998) ont aussi observé une grande variation des lectures de chlorophylle en fonction de la localisation et des conditions du milieu. Piekielek et Fox (1992) ont obtenu des lectures de chlorophylle variant entre 11,5 et 59,6 selon le site et la feuille échantillonnée. De plus, tout autre facteur de stress pour la plante, tels qu'une déficience pour un autre élément que l'azote, une maladie, un dommage causé par un insecte ou des températures froides, peut influencer les lectures de chlorophylle (Piekielek et Fox, 1992).

4.5.3.3. Stade de développement

Schepers et al. (1992) ont évalué la variation saisonnière des lectures de chlorophylle pour deux hybrides et quatre différentes doses d'azote (Fig. 4.13). Ils ont ainsi pu constater que les lectures de chlorophylle ne sont pas stables dans le temps en plus d'être différentes entre les cultivars.

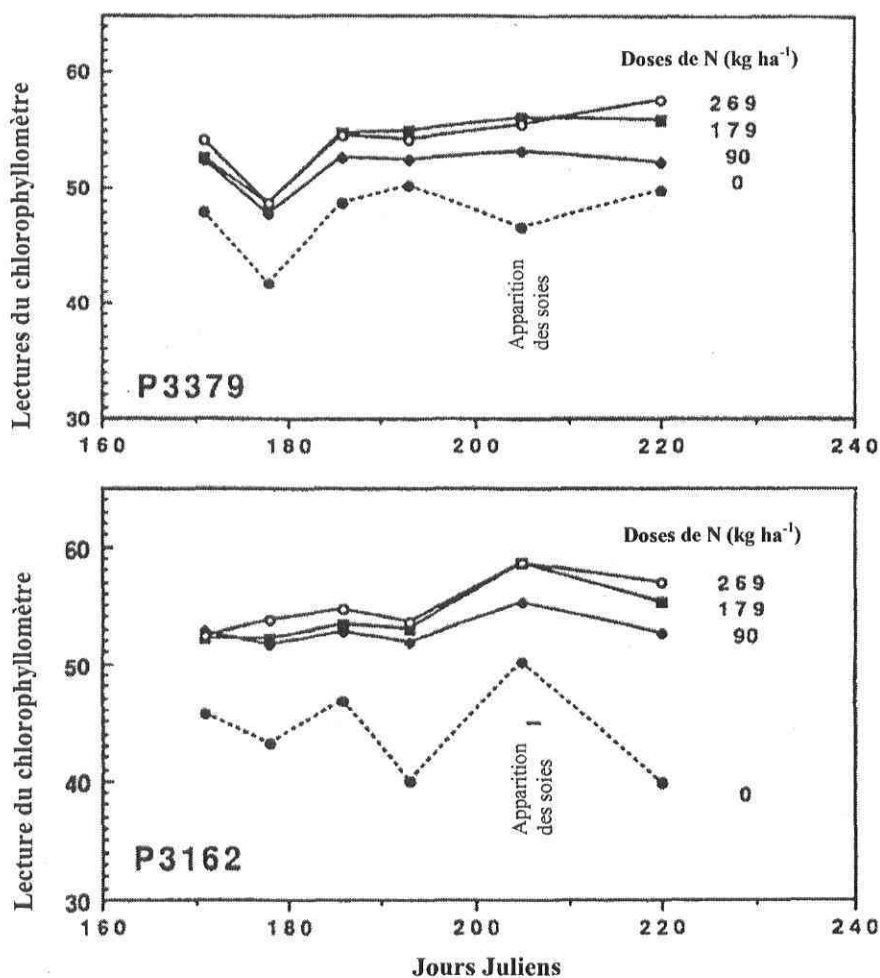


Figure 4.13. Variations saisonnières des lectures du chlorophyllomètre pour deux hybrides de maïs à quatre niveaux de fertilisation azotée (Adaptée de Schepers et al. 1992).

Il est aussi important de ne pas confondre des lectures plus faibles en fin de saison avec le début du jaunissement naturel associé à la sénescence de la plante. Selon les résultats de Waskom et al. (1996), les lectures du SPAD au stade 6 feuilles (V6) ne sont pas corrélées avec le rendement final en grains. Toutefois, les lectures à la sortie des épis (VT) ont permis de bien prédire le rendement en grains sur sept des huit sites de recherche. Les stades de prise de mesure optimaux seraient donc entre V10 et VT (Fig. 4.14).








	Stades de croissance végétative (V)						
	VE	VI	V4	V6	V8	V12	VT
Illustration							
Collerettes	0	1	4	6	8	12	(variable)
Pointe des feuilles	1	3	7	10	11	15	--
Feuille recourbée	0	2	6	8	10	14	--
UTM requise	180	330	630	780	930	1 170	1 310

Figure 4.14. Différents stades de croissance végétative du maïs-grain (Ministère de l'agriculture, de l'alimentation et des affaires rurales de l'Ontario, 2002).

4.5.3.4. Dose d'azote appliquée

L'indice de chlorophylle est affecté par la dose d'azote appliquée. Tel qu'illustré dans la figure 4.13, tirée de l'étude de Schepers et al. (1992), les lectures du chlorophyllomètre augmentent avec une augmentation de la dose d'azote. Mais comme les lectures de l'appareil plafonnent aux concentrations élevées de N, il est difficile de distinguer une dose optimale d'une dose excessive (Schepers et al., 1992 ; Dwyer, 1994).

4.5.4. Perspectives de diagnostic

Les facteurs de variation mentionnés précédemment, comme le cultivar, les conditions du milieu, le stade de développement des plantes et la dose d'azote, influencent les valeurs SPAD et rendent difficile l'établissement d'un indice de chlorophylle critique applicable dans toutes les situations. Toutefois, différents auteurs proposent de normaliser les lectures avec une parcelle de référence adéquatement fertilisée en N afin de tenir compte des facteurs de variation autre que l'azote (Schepers et al., 1992; Schroder et al., 2000; Bélec et al., 2006). Pour ce faire, il suffit de calculer l'indice de saturation en chlorophylle en appliquant la formule suivante :

$$\frac{\text{Valeur «Champ»}}{\text{Valeur «Parcelle de référence»}} \times 100 \quad (5)$$

Bélec et al. (2006) ont aussi établi une grille de fertilisation selon la valeur de l'indice de saturation pour déterminer la dose d'azote à apporter en post-levée au Québec (Tableau 4.1). Cette grille est valide seulement pour les producteurs qui utilise une fertilisation minérale et non pour ceux appliquant une fertilisation organique.

Tableau 4.1. Grille de fertilisation pour le maïs-grain (sans fumier) (Bélec et al., 2006)

Indice de saturation (%)	Recommandation N post-levée (kg N ha ⁻¹)
> 100	75
95 – 99,9	90
90 – 94,9	105
85 – 89,9	120
80 – 84,9	135
< 80	150

Waskom et al. (1996) ont aussi utilisé une parcelle bien fertilisée comme référence. Toutefois, contrairement à Bélec et al. (2006) qui ont établi une grille de fertilisation selon l'indice de saturation, ceux-ci mentionnent seulement que lorsque le lecteur de chlorophylle indique une lecture inférieure à 95 % de celle de la parcelle de référence dans le même champ, une fertilisation additionnelle est nécessaire, sans faire de recommandation précise. Comme il a été mentionné précédemment, les auteurs ont défini que la période optimale pour prendre les lectures est aux stades V10 à VT du maïs, puisqu'il existe une corrélation entre

les lectures et le rendement final en grain à ces stades, contrairement au stade V6 auquel aucune corrélation n'a été obtenue.

Piekielek et Fox (1992) ont déterminé un indice de chlorophylle critique de 43,4 unités SPAD, qui permet de séparer les sites répondant de ceux ne répondant pas à une fertilisation azotée supplémentaire. Toutefois, la corrélation ($r = 0,59$) entre les lectures du SPAD et la capacité du sol à fournir de l'azote n'était pas assez élevée pour déterminer les doses de fertilisant à apporter pour les sites répondants. Dans une étude ultérieure, Piekielek et al. (1995) ont déterminé un indice critique de 52,0 unités SPAD, qui permet de séparer les traitements déficients des traitements ayant reçu une quantité d'azote suffisante. Ainsi, pour les plantes montrant une lecture inférieure à ce niveau critique, un ajout d'azote est nécessaire pour obtenir un rendement maximum. La quantité d'azote à appliquer en cas de manque, ou qui a été appliquée en surplus, dans le cas d'une lecture supérieure à 52, ne peut cependant pas être déterminée. Les auteurs ont donc établi un intervalle de suffisance de 52 à 56 unités SPAD, au-dessus duquel il y a une probabilité de 70 % d'avoir appliqué un excès de plus de 50 kg N ha^{-1} . Smeal et Zhang (1994) suggèrent aussi une lecture critique du SPAD de 52 au stade de l'anthèse afin de prévenir les réductions de rendement dans le maïs.

Rashid et al. (2004) ont, pour leur part, déterminé un indice critique de 41 unités SPAD en utilisant un calcul de la dose d'application maximale économique d'engrais (DAME). Ainsi, selon l'équation de la courbe obtenue, ils affirment qu'une diminution d'une unité SPAD augmente de 9 kg N ha^{-1} les besoins en engrais du maïs (Fig. 4.15) selon un ratio entre le prix des fertilisants et le prix des grains de 7.

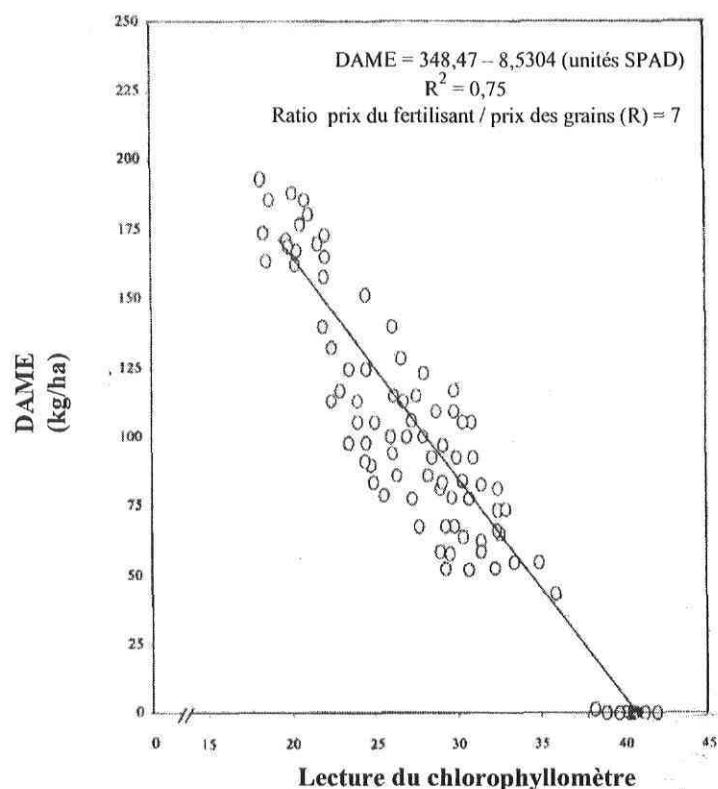


Figure 4.15. Relation entre les lectures du chlorophyllomètre du maïs au stade 5-6 feuilles et la dose d'application maximale économique d'engrais (DAME) (Adaptée de Rashid et al., 2004).

Toutefois, aucune étude n'a été faite au Québec pour déterminer un indice de chlorophylle critique avec les valeurs absolues pour la culture du maïs-grain. En effet, les études effectuées utilisaient plutôt une parcelle de saturation afin de calculer un indice de saturation en chlorophylle. De plus, aucune étude n'a mis en relation l'indice de chlorophylle avec l'indice de nutrition azotée.

5. MATÉRIEL ET MÉTHODES

5.1. Sites expérimentaux

5.1.1. Caractéristiques générales

Les essais au champ se sont déroulés sur trois sites par année pendant deux saisons de croissance (2004-2005), pour un total de six sites-années. La localisation de chaque site est présentée au tableau 5.1 Pour chacune des deux années, un site était situé sur la ferme expérimentale à L'Acadie, administrée par le Centre de Recherche et Développement en Horticulture (CRDH) d'Agriculture et Agroalimentaire Canada de St-Jean-sur-Richelieu; les deux autres sites étaient des champs en production commerciale situés à St-Louis-sur-Richelieu (St-Louis) et à St-Basile de Porneuf (St-Basile) en 2004 et à St-Louis-sur-Richelieu (St-Louis) et Sainte-Catherine de la Jacques-Cartier (Ste-Catherine) en 2005. Les sites ont été choisis en fonction de la texture de surface du sol, qui variait de sable à loam et des précédents cultureux (maïs, soya ou pommes de terre ; Tableau 5.1). Les sites sélectionnés appartenaient à deux ordres de la classification canadienne des sols soit l'ordre gleysolique et l'ordre podzolique (Groupe de travail sur la classification canadienne des sols, 2002). La texture de surface a été déterminée par la méthode de l'hydromètre après une oxydation de la matière organique (Sheldrick et Wang, 1993). La capacité d'échange cationique (CEC) a été déterminée dans une solution de NH_4OAc 1M à un pH de 7 et avec un ratio sol : solution de 12 : 5 (Hendershot et al., 1993) La concentration en matière organique (M.O.) a été déterminée par oxydation en milieu humide (Tiessen et Moir, 1993). Le pH a été évalué dans l'eau distillée avec un ratio sol:solution de 1:2 (Hendershot et al., 1993) et dans une solution tampon (pH_{SMP} ; CPVQ, 1988). Finalement, les éléments du sol (P, K, Ca, Mg et Al) ont été extraits selon la méthode Mehlich-3 (Tran et Simard, 1993) et le rapport P/Al a été calculé (CRAAQ, 2003). Les caractéristiques physico-chimiques des sols de chaque site sont présentées dans le tableau 5.2.

Tableau 5.1. Localisation, texture de surface et précédents culturels des sites, saisons 2004-2005

année	Localité	Coordonnées		Texture de surface	Classification des sols	Précédent cultural
		Longitude	Latitude			
2004	L'Acadie	73°20'W	45°17'N	Loam	Gleysol humique orthique	Maïs
	St-Louis	73°00'W	45°51'N	Loam sableux	Gleysol humique orthique	Soya
	St-Basile	71°46'W	46°48'N	Sable loameux	Podzol humo-ferrique orthique	Pomme de terre
2005	L'Acadie	73°20'W	45°17'N	Loam sableux	Brunisol mélanique gleyifié	Soya
	St-Louis	72°59'W	45°51'N	Loam sableux	Gleysol humique orthique	Maïs
	Ste-Catherine	71°39'W	46°49'N	Sable	Podzol humo-ferrique orthique	Pomme de terre

Tableau 5.2. Caractéristiques physico-chimiques de la couche de surface des sites expérimentaux (0-20 cm)

Sites	CEC meq (100 g) ⁻¹	M.O. (%)	pH _{eau}	pH _{SMP}	Éléments nutritifs extraits au Mehlich-3					Saturation en P (%) ¹
					P	K	Ca	Mg	Al	
					-----kg ha ⁻¹ -----					
L'Acadie 2004	n.d.	4,3	7,0	n.d.	54	229	5495	441	856	2,8
St-Louis 2004	11,35	1,58	7,5	7,5	259	279	4475	282	608	19,1
St-Basile 2004	12,66	4,00	6,2	6,5	382	228	4180	123	2028	8,4
L'Acadie 2005	17,40	3,10	6,7	7,0	69	217	365	5042	344	9,0
St-Louis 2005	10,75	2,30	7,5	7,5	210	223	4025	407	645	7,1
Ste-Catherine 2005	13,30	5,90	5,6	5,9	279	194	2820	100	1886	1,5

¹ : Saturation en P = (mg P kg⁻¹ extrait au Mehlich-3/mg Al kg⁻¹ extrait au Mehlich-3)x100

Les hybrides de maïs utilisés ont été sélectionnés selon leur adaptation aux conditions climatiques de chaque site. Pour les deux années, les hybrides étaient les suivants : sites de L'Acadie (2004 et 2005) : Pioneer 38A24 (2900 unités thermiques maïs (UTM)); site de St-Louis (2004 et 2005) : Pioneer 39D82 (2625 UTM) et site de St-Basile (2004) et Ste-Catherine (2005) : Pioneer 39W54 (2100 UTM).

5.1.2. Données climatiques

Les figures 5.1 et 5.2 présentent les précipitations et les températures observées sur chaque site en 2004 et 2005, ainsi que les valeurs moyennes des trente dernières années (1971-2000). Les deux années ont connu des températures près des normales de saison, bien que l'année 2005 ait été légèrement plus chaude. La saison 2004 a été généralement plus sèche que la normale, tandis qu'en 2005 les précipitations ont été plus abondantes, surtout en fin de saison, soit d'août à octobre. Les données climatiques ont été mesurées aux stations d'Environnement Canada de Fleury (45° 48' N; 73° 00' W) pour les sites de St-Louis, de Ste-Christine-de-Portneuf (45° 49' N; 71° 55' W) pour les sites de St-Basile et Ste-Catherine et de L'Acadie (45° 17' N; 73° 21' W) pour les sites de L'Acadie (Environnement Canada, 2001).

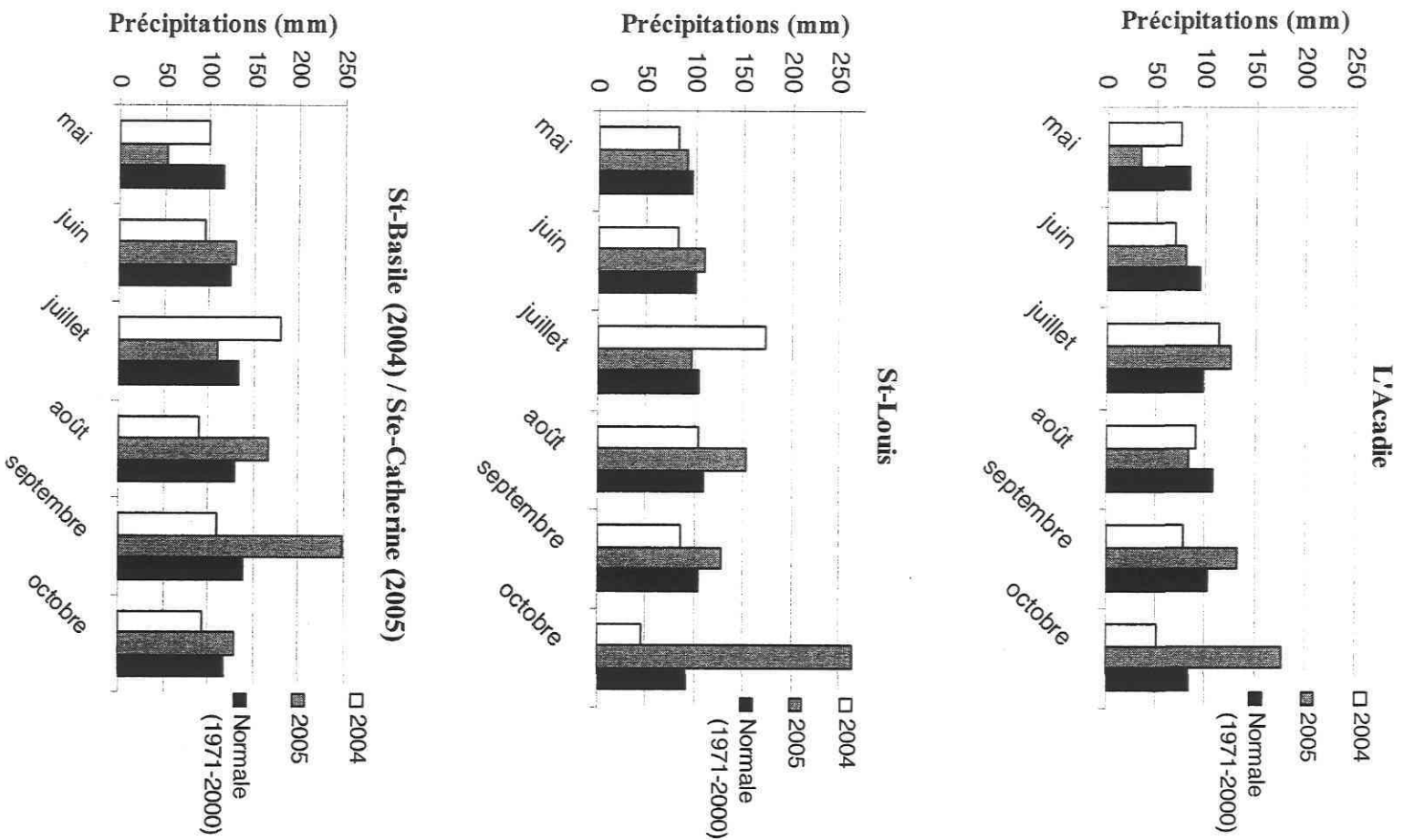
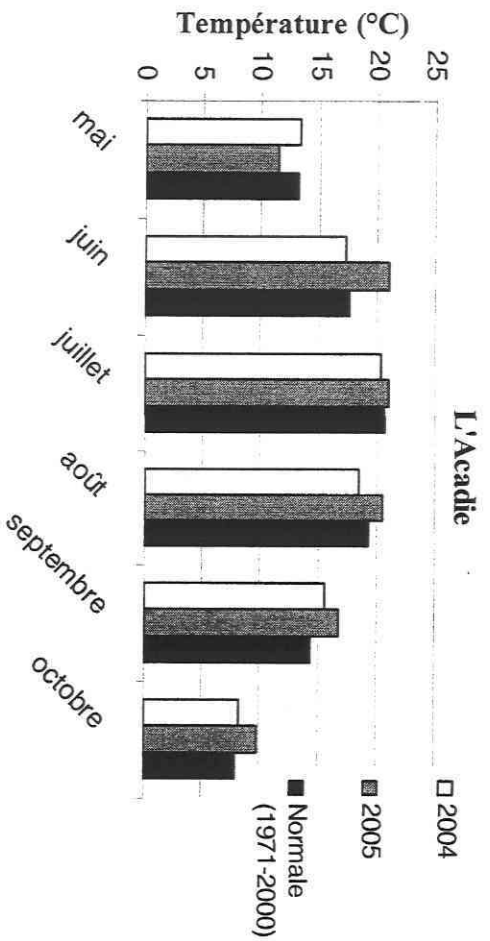
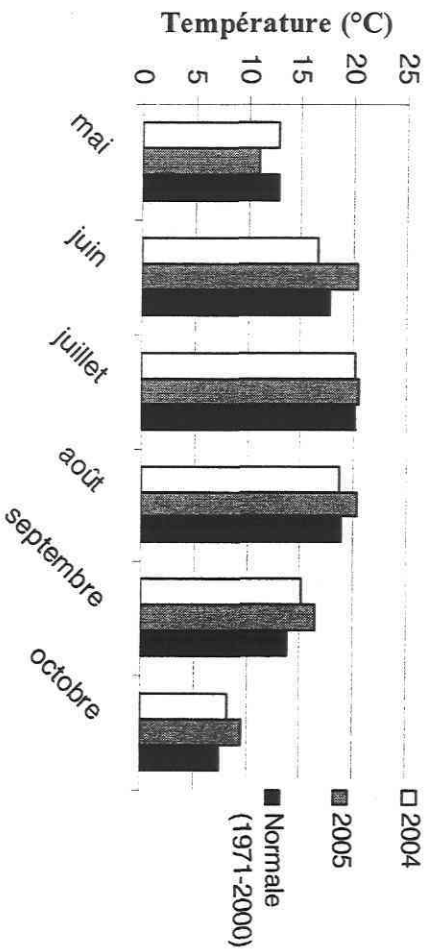


Figure 5.1. Précipitations mensuelles mesurées sur chaque site en 2004 et 2005 (Environnement Canada, 2001).



St-Louis



St-Basile (2004) / Ste-Catherine (2005)

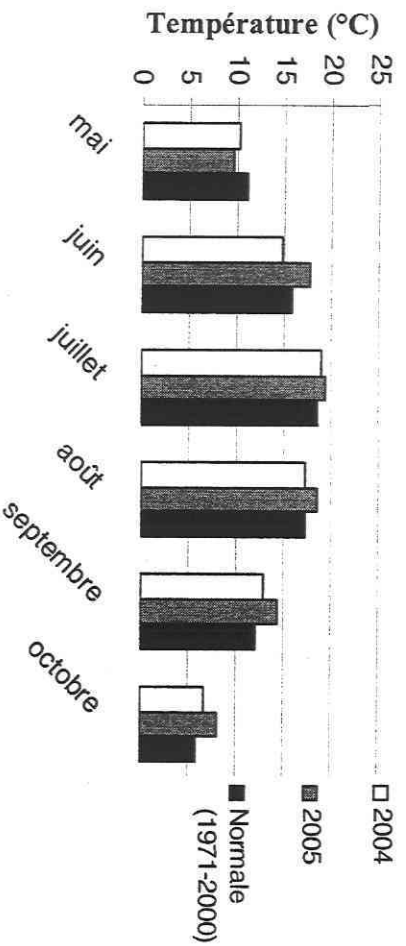


Figure 5.2. Températures moyennes mensuelles mesurées sur chaque site en 2004 et 2005 (Environnement Canada, 2001).

5.2. Calendrier des activités

Les dates de semis, fertilisation et récolte (Tableau 5.3) ont été adaptées aux conditions climatiques ou aux stades de développement des plantes à chaque site.

Tableau 5.3. Calendrier des activités de champ 2004 et 2005

Sites	Semis	2 ^e application de N		Récolte
		Date	Stade de développement ¹	
L'Acadie 2004	18 mai	28 juin	V8	26 octobre
St-Louis 2004	15 mai	7 juillet	V10	26 octobre
St-Basile 2004	21 mai	9 juillet	V6	28 octobre
L'Acadie 2005	12 mai	23 juin	V8	14 novembre
St-Louis 2005	17 mai	21 juin	V8	17 octobre
Ste-Catherine 2005	6 mai	27 juin	V8	26 octobre

¹ : Voir figure 4.14 pour les stades de croissance du maïs

5.3. Traitements

À chacun des six sites, un plan d'expérience en bloc complet aléatoire avec quatre répétitions a été mis en place. Le dispositif expérimental se composait de sept (champs en production commerciale) ou de quatre (ferme expérimentale) traitements distribués de façon aléatoire dans chaque bloc. Les parcelles situées sur les champs commerciaux avaient une dimension de 9 m (12 rangs de maïs espacés de 0,75 m) X 10 m de long, donc 90 m² par parcelle, pour un total de 28 parcelles. Les parcelles situées à la ferme expérimentale de L'Acadie avaient une dimension de 6 m (8 rangs de maïs espacés de 0,75 m) X 10 m de long, donc 60 m² par parcelle, pour un total de 16 parcelles.

Un engrais de démarrage a tout d'abord été appliqué en bande au semis sur tous les sites. Celui-ci était composé d'une dose unique de K₂O et de P₂O₅ suffisante pour l'ensemble des six sites, ainsi que de 20 ou 30 kg N ha⁻¹. Les doses de K₂O et de P₂O₅ ont été déterminées en se basant sur les analyses de sol et les recommandations du CRAAQ (CRAAQ, 2003) en s'assurant qu'elles étaient suffisantes pour éliminer toute possibilité de carence en ces deux

éléments. Le mélange utilisé au semis contenait donc 20 kg N ha⁻¹ (30 kg N à l'Acadie en 2005), 70 kg P₂O₅ et 75 kg K₂O ha⁻¹ (100 kg K₂O en 2005). Les sources d'engrais étaient le nitrate d'ammonium (27-0-0), le monoammonium phosphate (MAP; 11-52-0), le muriate de potassium (0-0-60) (50 % de la dose) et le sulfate de potasse (0-0-22) (50 % de la dose).

Au stade 8 feuilles, la fertilisation azotée a été ajustée pour obtenir les doses totales de N pour les traitements 2 à 6 dans les champs en production commerciale (Tableau 5.4) et les traitements 2 à 4 à la ferme expérimentale de L'Acadie (Tableau 5.5) à l'exception des sites St-Louis et St-Basile en 2004, qui ont reçu leur deuxième application de N au stade 10 feuilles et 6 feuilles respectivement. Le fertilisant utilisé était le 27-0-0 et il a été appliqué en bande à 10 cm du rang de maïs et légèrement recouvert de sol. Des parcelles, dites de saturation (traitement 7), ont reçu la même quantité de K₂O, P₂O₅ et N en bande que les autres traitements au semis, ainsi que le reste de la dose d'azote, soit 230 kg N ha⁻¹, appliqué à la volée sous forme de 27-0-0. Aucune parcelle de saturation n'a été faite à la ferme expérimentale de L'Acadie.

Tableau 5.4. Traitements expérimentaux pour la culture du maïs-grain chez les producteurs à St-Louis, St-Basile et Ste-Catherine

# identification	Dose totale de N	Fractionnement	
		Au semis	2 ^{ème} application de N ²
		(kg N ha ⁻¹)	
1	20	20	0
2	50	20	30
3	100	20	80
4	150	20	130
5	200	20	180
6	250	20	230
7	250_sat ¹	20 + 230 à la volée	

¹: Parcelle de saturation, toute la dose appliquée au semis.

²: Deuxième application de N faite au stade 8 feuilles, à l'exception des sites de St-Basile et St-Louis en 2004 où elle a été effectuée au stade V6 et V10.

Tableau 5.5. Traitements expérimentaux pour la culture du maïs-grain à la ferme expérimentale de L'Acadie

# identification	Année	Dose totale de N (kg N ha ⁻¹)	Fractionnement (kg N ha ⁻¹)	
			Au semis	2 ^{ème} application de N ¹
1	2004	20	20	0
2		73	20	53
3		125	20	105
4		178	20	158
1	2005	30	30	0
2		83	30	53
3		135	30	105
4		188	30	158

¹: Deuxième application de N faite au stade 8 feuilles, à l'exception des sites de St-Basile et St-Louis en 2004 où elle a été effectuée au stade V6 et V10.

5.4. Analyse des tissus végétaux

5.4.1. Indice de nutrition azotée (objectif 1)

Dans chaque parcelle, l'échantillonnage des plantes s'est effectué sur une longueur de 2 m. La densité de semis étant de 93 333 grains ha⁻¹, il y avait en moyenne 10 à 12 plantes sur 2 m linéaire. Toutes les plantes se trouvant sur ce 2 m ont été récoltées en s'assurant qu'il y en avait au moins 10. L'échantillonnage des plantes a été effectué selon le plan d'échantillonnage illustré à la figure 5.3 en 2004, c'est-à-dire 8 échantillonnages, aux stades 2, 4 et 8 feuilles, ce dernier correspondant à la semaine 1 et par la suite une fois par semaine jusqu'à la semaine 6. En 2005, une légère modification a été apportée puisque le premier échantillonnage (2 feuilles) n'a pas eu lieu.

Pour les premiers stades, c'est-à-dire ceux ayant une biomasse faible, toutes les plantes situées dans la zone d'échantillonnage ont été coupées à ras le sol et mises dans un sac pour être pesées. Pour les stades plus avancés, c'est-à-dire ceux ayant une biomasse plus élevée, les plantes récoltées dans la zone d'échantillonnage ont été pesées et par la suite, un sous-échantillon de cinq plantes a été conservé, mis dans un sac et pesé. Dans les deux cas, les sacs ont été mis à l'étuve à 55 °C pendant 5 à 7 jours et les poids secs ont été mesurés.

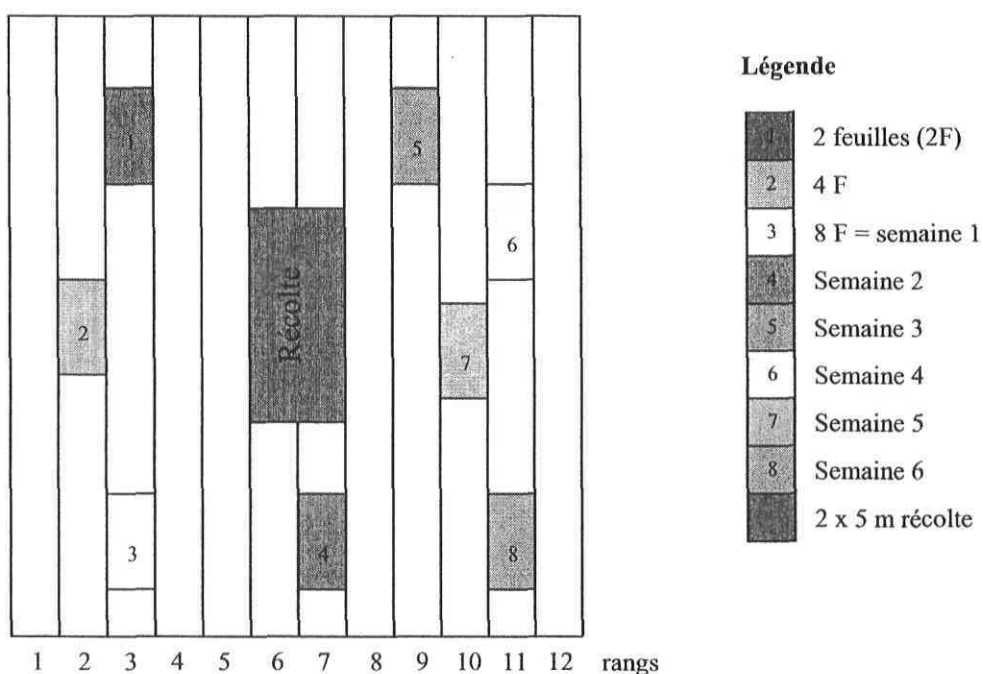


Figure 5.3. Exemple d'un plan d'échantillonnage de maïs sur les champs commerciaux en 2004.

Les épis de maïs ont été récoltés manuellement au cours des mois d'octobre et novembre pour les deux années. Les rendements en grains ont été déterminés sur deux rangs centraux de cinq mètres dans chaque parcelle (Fig. 5.3). Pour ce faire, les épis ont été pesés frais, ont été égrainés et les grains ont été séchés à 55 °C jusqu'à ce qu'ils atteignent un poids constant. Par la suite le rendement en grain a été ajusté à 14 % d'humidité.

Les plantes et les grains ont ensuite été broyés et une digestion acide a été effectuée sur un échantillon de 0,1 g en utilisant un mélange d'acide sulfurique et sélénieux pour faire une extraction du N selon la méthode micro-Kjeldhal telle que décrite par Isaac et Johnson (1976). L'azote ainsi extrait a ensuite été dosé par colorimétrie à l'aide du Lachat Instruments (Milwaukee, WI, USA) à l'aide de la méthode QuikChem® TKN 13-107-06-2-E. L'analyse de ces résultats permettra de valider la courbe de dilution de l'azote et ainsi, de répondre à l'objectif 1.

5.4.2. Lectures de chlorophylle (objectif 2)

Afin de confirmer la relation existant entre la teneur en N des feuilles et leur teneur en chlorophylle, la dernière feuille ligulée de 10 plantes situées dans la zone d'échantillonnage a été récoltée pour les premiers stades (petites feuilles) et mis dans un sac pour ensuite être

pesées. Lorsque les feuilles étaient assez grandes, des disques de 1,5 cm² au site de L'Acadie 2004 et 0,71 cm² aux autres sites ont été prélevés avec un emporte-pièce dans le tiers médian de la dernière feuille ligulée. Dix disques par feuille en 2004 et 20 disques par feuille en 2005 ont été pesés et mis dans une enveloppe pour être séchés à l'étuve pendant cinq à sept jours à 55°C.

Par la suite, afin de vérifier s'il existe bel et bien une relation entre l'indice de nutrition azotée et les lectures de chlorophylle et, si tel est le cas, de déterminer un indice de chlorophylle critique, des lectures de chlorophylle ont été prises sur les 10 feuilles échantillonnées, 10 autres ont été prises sur les plantes de la région avoisinante et la moyenne des 20 lectures a été notée. Les lectures étaient toujours prises sur le tiers médian de la dernière feuille ligulée en évitant la nervure (Fig. 4.12).

On a finalement pris le poids sec des feuilles et des disques et ceux-ci ont été broyés pour faire une extraction et un dosage de l'azote selon la méthode décrite précédemment.

5.5. Analyse des sols (objectif 3)

Pour chacune des dates d'échantillonnage des plantes, un échantillon composite de sol de quatre sous échantillons (0-15 cm) a été pris dans la zone d'échantillonnage des plantes. Une extraction au KCl (2 N) a ensuite été effectuée tel que décrit par Maynard et Kalra (1993), suivie d'un dosage par chromatographie liquide avec le Dionex 4000 (Dionex Corp., Sunnyvale, CA) pour déterminer la quantité de NO₃ présente. Les résultats obtenus lors de ces analyses permettront d'établir une relation entre les nitrates du sol et l'indice de nutrition azotée, et ainsi de répondre à l'objectif 3.

5.6. Analyse statistique

5.6.1. Analyse de variance

L'analyse des données recueillies au cours de l'essai au champ, ainsi que des régressions linéaires ou quadratiques, ont été faites avec le logiciel SAS (2001). Le traitement des données et les graphiques ont été réalisés avec le logiciel EXCEL 2002 (Microsoft, 2001). Tout d'abord, l'effet des différentes doses de N sur l'ensemble des paramètres mesurés et calculés (biomasse aérienne, teneur en N des plantes et des feuilles, lectures de chlorophylle,

indice de nutrition azotée et teneur en nitrates du sol) pour chaque date d'échantillonnage, site et année, a été évalué à l'aide d'une analyse de la variance en utilisant la procédure GLM (General linear model) de SAS (2001). La décomposition des degrés de liberté du modèle pour chacun des sites et chacune des dates d'échantillonnage à chaque année est décrite au tableau 5.6. Les plus petites différences significatives (PPDS) et les écarts types de la moyenne (ETM) ont aussi été calculés. Pour l'analyse de la teneur en nitrates du sol, des transformations logarithmiques ont été effectuées lorsque jugé nécessaire, c'est-à-dire lorsque la normalité et l'homogénéité des variances des résidus n'étaient pas respectées.

Tableau 5.6. Décomposition des degrés de liberté de l'ANOVA

Sources de variation	Degrés de liberté	
	Champs en production commerciale	Ferme expérimentale
Traitements	6	3
Blocs	3	3
Erreur	18	9
Total	27	15

Des contrastes polynomiaux ont été effectués pour les doses d'azote. L'utilisation de contrastes polynomiaux à *posteriori* a permis de vérifier le degré de signification de la fertilisation azotée sur les réponses linéaire ou quadratique des variables indépendantes, soit la biomasse, la teneur en N des plantes et des feuilles, les lectures de chlorophylle, l'indice de nutrition azotée et la teneur en nitrates du sol.

5.6.2. Validation du modèle de Plénet et Lemaire (2000)

Un des objectifs de l'étude était de valider le modèle de Plénet et Lemaire (2000) qui décrit la teneur critique en azote (N critique) chez le maïs. La méthode de Justes et al. (1994), développée pour définir une courbe critique chez le blé, a tout d'abord été utilisée afin de vérifier s'il était possible de définir une nouvelle équation de la courbe propre aux conditions du Québec. Cependant, cette méthode demande une très grande quantité de données puisque seulement celles répondant à tous les critères peuvent être utilisées, ce qui correspond généralement à environ 15 % des données totales. Il a donc été impossible d'établir une nouvelle courbe à l'aide de cette méthode puisque les données disponibles étaient largement insuffisantes. En effet, sur les 6 sites, les données de seulement 27 dates d'échantillonnage

étaient disponibles ; sur ces 27 dates, seulement quatre répondaient aux critères de Justes et al. (1994) pour définir la courbe, ce qui a rendu impossible l'utilisation de cette méthode pour la détermination d'une nouvelle équation.

Bien qu'il ait été impossible d'établir une nouvelle courbe, les données disponibles ont tout de même été utilisées pour valider la courbe de la teneur critique en N du maïs de Plénet et Lemaire ($N_c = 34W^{-0,37}$; 2000) pour les conditions pédoclimatiques du Québec.

Afin de faire la validation, le test statistique du LSD (Least Significant Difference; Plus Petite Différence Significative; PPDS) protégé ($\alpha = 0,10$) a été utilisé pour déterminer les doses d'azote étant considérées comme limitantes et non limitantes sur chaque site et à chaque date d'échantillonnage et ce, pour les deux années (2004-2005). La valeur de 0,10 a été préférée à celle de 0,05 puisqu'il était souvent impossible de trouver des différences significatives entre les traitements au seuil 0,05 et que l'objectif était de bien distinguer deux groupes, soit les doses limitantes et non limitantes dans les conditions présentes au champ. Cette analyse n'a été faite que pour les dates d'échantillonnage où la biomasse aérienne était supérieure à 1 tonne de matière sèche (MS) par hectare, puisque l'équation de la courbe n'est pas valide pour les biomasses inférieures à 1 t MS ha⁻¹ (Plénet et Lemaire, 2000).

Ce test a tout d'abord permis d'identifier les plus petites différences significatives (PPDS) pour la biomasse entre les traitements azotés. Il a par la suite été possible d'établir différents groupes (A, B, C, etc.), selon que chaque traitement permettait l'obtention d'une biomasse similaire ou significativement différente des autres traitements (Tableau 5.7). Un traitement pouvait appartenir à plus d'un groupe.

Tableau 5.7. Exemple de sortie SAS pour le LSD protégé alpha = 0,1 et différents groupes formés

Groupes	Doses de N (kg ha ⁻¹)	Biomasse (t ha ⁻¹)
A	100	12,07
A	200	11,95
A	250_sat	11,70
A	250	11,66
A	150	11,25
B	50	10,18
B	20	9,77

Lorsqu'un traitement appartenait à deux groupes ou plus, par exemple au groupe A, correspondant au groupe ayant les plus fortes biomasses et au groupe B, correspondant au groupe ayant les biomasses les plus faibles, il devenait impossible de dire de manière sûre s'il s'agissait d'un traitement limitant ou non pour la croissance de la plante. Dans ce cas, le traitement en question était alors éliminé, puisque l'objectif de la validation était de dire avec le plus de certitude possible si un traitement provoquait un état de carence ou de suffisance (ou surplus) en N. Ainsi, seulement les traitements appartenant à un seul groupe, soit le premier ou le dernier, étaient considérés pour valider la courbe. Aussi, lorsque aucune différence significative n'était détectée entre les traitements pour une date donnée, celle-ci était éliminée puisqu'il existait toujours une incertitude à savoir si les traitements étaient limitants ou non limitants pour la croissance des plantes. Ainsi, seulement les dates pour lesquelles il existait une différence significative entre les traitements ont été utilisées pour la validation de la courbe.

Dans l'exemple présenté au tableau 5.7, les doses de 100 à 250_sat kg N ha⁻¹ ont été considérées comme étant non limitantes puisqu'elles appartenaient toutes au groupe de tête, donc aux biomasses les plus élevées, entre lesquelles il n'existait pas de différence significative. Pour ce qui est des doses de 20 et 50 kg N ha⁻¹, elles ont été considérées comme étant limitantes pour la croissance des plantes puisqu'elles appartenaient au groupe ayant les biomasses les plus faibles. Une augmentation de la dose d'azote aurait donc permis une augmentation de la biomasse, les faisant passer d'un état de carence à un état de suffisance.

Une autre situation pouvait survenir. En effet, il arrivait parfois que le traitement 250_sat se retrouve dans le groupe limitant. Toutefois, il semble improbable que la dose la plus élevée provoque un état de carence. Ainsi, afin de vérifier s'il s'agissait bel et bien d'une carence ou plutôt d'un excès, qui amenait une diminution de rendement, la PPDS protégée pour la teneur en N des plantes était utilisée. Dans les cas où la teneur en N du traitement de 250_sat se retrouvait dans le groupe ayant les plus faibles teneurs en N, le traitement était bel et bien considéré limitant. Toutefois, s'il se retrouvait dans le groupe de tête (A), c'est-à-dire le groupe ayant les plus fortes teneurs en N, ceci nous indiquait que la diminution de rendement n'était probablement pas associée à une carence, mais plutôt à une surfertilisation azotée qui aurait entraîné une diminution de la biomasse, ce traitement était alors éliminé.

5.6.2. Analyse des relations entre variables

Des régressions linéaire ou quadratique ont été effectuées à l'aide de la procédure PROC REG du logiciel SAS afin de vérifier l'existence de relations significatives entre l'indice de chlorophylle et l'INA, ainsi qu'entre les nitrates du sol et l'INA et ce, pour chaque site et pour tous les sites regroupés.

Finalement, une analyse des régressions multiples pour différents groupes a été utilisée afin de déterminer si les courbes de réponses étaient différentes entre les sites. Pour ce faire, la procédure Fit de Genstat 5 (Genstat 5 Committee, 1993) a été utilisée. Les courbes de réponse étaient décrites par le modèle suivant :

$$Y = a + bX + cX^2 \quad (6)$$

où Y est la variable réponse, c'est-à-dire l'indice de chlorophylle, X est la variable explicative, c'est-à-dire l'indice de nutrition azotée et a , b et c sont les paramètres estimés. La procédure a tout d'abord calculé une équation (pour les six sites) pour décrire la réponse moyenne de l'IC à l'INA. Par la suite, les paramètres a , b et c ont été estimés les uns après les autres pour chacun des sites individuellement afin de vérifier l'amélioration de la régression lorsque les paramètres a , b ou c sont différents pour chaque courbe.

6. RÉSULTATS ET DISCUSSION

6.1. Modèle de la teneur critique en azote

6.1.1. Effet de la fertilisation azotée sur la biomasse et la teneur en N des plantes

Les biomasses aériennes utilisées pour la validation de la courbe de Plénet et Lemaire (2000) variaient entre 1 et 12 t MS ha⁻¹ selon le traitement, la date d'échantillonnage, le site et l'année. L'analyse de la variance a révélé un effet significatif de la dose d'azote (F_{TRAIT}) sur la biomasse aérienne et ce, pour la plupart des dates (Tableaux 6.1 à 6.3). De manière générale, la biomasse aérienne augmentait en suivant une relation quadratique (données non présentées) avec une augmentation de la dose d'azote, les biomasses les plus faibles étant observées avec les traitements de 20 et 50 kg N ha⁻¹.

Les teneurs en N, variaient entre 6 et 39 g N kg⁻¹ MS selon le traitement, la date d'échantillonnage, le site et l'année. L'analyse de la variance a aussi révélé un effet significatif de la dose d'azote (F_{TRAIT}) sur la teneur en N des plantes durant toute la saison de croissance à l'exception d'une seule date à L'Acadie en 2004 (Tableaux 6.4 à 6.6). Il est possible d'observer une augmentation de la teneur en N des plantes avec une augmentation de la dose d'azote reçue dans la plupart des cas. Cette augmentation de la teneur en N dans la plante avec une augmentation de la dose d'azote appliquée est comparable aux résultats obtenus dans d'autres études effectuées dans l'est du Canada (Isfan et al., 1995 ; Simard et al., 2001).

Tableau 6.1. Biomasses aériennes du maïs fertilisé avec différentes doses d'azote aux sites de la région de Portneuf (St-Basile, 2004 et Ste-Catherine, 2005)

Année	Date d'échantillonnage	UTM ³	Dose d'azote totale appliquée (kg N ha ⁻¹) ¹							PPDS ⁴	ETM ⁵	F _{TRAIT} ⁶
			20	50	100	150	200	250	250_sat ²			
			Biomasse aérienne (t MS ha ⁻¹)									
2004	30-juil	1285	2,30	3,18	2,97	3,19	3,07	3,13	2,47	0,592	0,242	*
	05-août	1416	3,45	5,85	4,93	5,10	5,14	4,75	4,01	1,504	0,613	NS
	11-août	1537	3,46	4,96	5,88	5,69	6,31	5,54	5,05	1,216	0,496	**
	20-août	1727	3,98	6,92	7,75	8,06	9,18	8,53	6,96	1,489	0,607	***
	25-août	1790	4,29	7,90	8,64	9,02	9,97	9,10	7,19	1,346	0,549	***
2005	11-juil	1084	1,00	1,22	1,30	1,27	1,28	1,34	1,20	ND ⁷	0,111 (0,130) ⁸	NS
	18-juil	1265	2,50	3,40	3,05	2,99	3,37	3,00	3,05	0,555	0,226	NS
	25-juil	1433	4,11	5,40	5,85	6,26	6,17	4,57	5,04	1,550	0,632	NS

¹ : Chaque parcelle a reçu 20 kg N ha⁻¹ au semis et le reste de la dose a été appliqué le 9 juillet en 2004 et le 27 juin en 2005.

² : 250_sat correspond à la parcelle saturée, c'est-à-dire ayant reçu la totalité de la dose (250 kg N ha⁻¹) au semis.

³ : Unité thermique maïs cumulée à partir du semis.

⁴ : Plus petite différence significative.

⁵ : Écart type de la moyenne.

⁶ : Les valeurs de F_{TRAIT} sont significatives à * : 0,10, ** : 0,05, *** : < 0,01 ou non significative : NS.

⁷ : PPDS non déterminée car une donnée était manquante.

⁸ : La valeur de l'ETM de 0,130 s'applique uniquement au traitement de 100 kg N ha⁻¹ car une donnée était manquante.

Tableau 6.2. Biomasses aériennes du maïs fertilisé avec différentes doses d'azote aux sites de St-Louis (2004 et 2005)

Année	Date d'échantillonnage	UTM ³	Dose d'azote totale appliquée (kg N ha ⁻¹) ¹							PPDS ⁴	ETM ⁵	F _{TRAIT} ⁶
			20	50	100	150	200	250	250_sat ²			
			Biomasse aérienne (t MS ha ⁻¹)									
2004	06-juil	976	1,43	1,24	1,54	1,46	1,44	1,32	1,57	0,199	0,081	*
	13-juil	1149	1,52	1,75	1,67	1,57	1,77	1,49	1,92	0,331	0,135	NS
	20-juil	1334	4,84	5,51	5,01	5,04	5,16	5,44	5,86	0,502	0,205	**
	27-juil	1494	6,71	7,58	7,89	7,23	7,42	7,93	8,07	0,932	0,370	NS
	02-août	1656	8,59	9,67	9,72	9,58	10,30	9,76	11,38	1,051	0,429	**
	09-août	1802	9,77	10,18	12,07	11,25	11,95	11,66	11,70	1,013	0,413	***
2005	06-juil	1034	1,26	1,39	1,32	1,52	1,50	1,34	1,49	0,264	0,108	NS
	13-juil	1206	2,82	2,36	2,91	3,12	3,24	2,94	3,69	0,807	0,329	NS
	20-juil	1410	3,83	4,52	5,27	5,23	5,07	5,67	5,89	0,742	0,303	***
	27-juil	1579	5,60	6,13	6,88	7,89	7,41	7,75	7,33	0,970	0,396	***

¹: Chaque parcelle a reçu 20 kg N ha⁻¹ au semis et le reste de la dose a été appliqué le 7 juillet en 2004 et le 21 juin en 2005.

²: 250_sat correspond à la parcelle saturée, c'est-à-dire ayant reçu la totalité de la dose (250 kg N ha⁻¹) au semis.

³: Unité thermique maïs cumulée à partir du semis.

⁴: Plus petite différence significative.

⁵: Écart type de la moyenne.

⁶: Les valeurs de F_{TRAIT} sont significatives à * : 0,10, ** : 0,05, *** : < 0,01 ou non significative : NS.

Tableau 6.3. Biomasses aériennes du maïs fertilisé avec différentes doses d'azote aux sites de la ferme expérimentale de L'Acadie (2004 et 2005)

Année	Date d'échantillonnage	UTM ²	Dose d'azote totale appliquée (kg N ha ⁻¹) ¹				PPDS ³	ETM ⁴	F _{TRAIT} ⁵
			20	73	125	178			
			Biomasse aérienne (t MS ha ⁻¹)						
2004	06-juil	960	1,84	2,20	2,28	2,12	0,634	0,2445	NS
	14-juil	1168	3,59	3,41	3,60	3,80	0,694	0,2677	NS
	23-juil	1410	6,11	5,91	6,09	6,42	0,845	0,3261	NS
	30-juil	1569	7,75	8,54	8,54	8,37	1,432	0,5522	NS
	04-août	1701	8,92	9,52	10,28	10,10	0,845	0,3261	*
			30	83	135	188			
2005	07-juil	1145	1,34	1,46	1,54	1,57	0,492	0,190	NS
	14-juil	1329	2,20	2,82	2,95	2,57	0,618	0,238	NS
	21-juil	1532	4,07	4,88	4,60	4,92	ND ⁶	0,342 (0,279) ⁷	NS
	28-juil	1700	5,25	7,11	7,08	7,95	ND	0,428 (0,514) ⁸	**

¹: Chaque parcelle a reçu 20 kg (2004) et 30 kg (2005) N ha⁻¹ au semis et le reste de la dose a été appliqué le 28 juin en 2004 et le 23 juin en 2005.

²: Unité thermique maïs cumulée à partir du semis.

³: Plus petite différence significative.

⁴: Écart type de la moyenne.

⁵: Les valeurs de F_{TRAIT} sont significatives à * : 0,10, ** : 0,05 ou non significative : NS.

⁶: PPDS non déterminée car une donnée était manquante.

⁷: La valeur de l'ETM de 0,279 s'applique uniquement aux traitements de 135 et 188 kg N ha⁻¹ car des données étaient manquantes.

⁸: La valeur de l'ETM de 0,514 s'applique uniquement au traitement de 135 kg N ha⁻¹ car une donnée était manquante.

Tableau 6.4. Concentration en azote du maïs fertilisé avec différentes doses d'azote aux sites de la région de Porneuf (St-Basile, 2004 et Ste-Catherine, 2005)

Année	Date d'échantillonnage	UTM ³	Dose d'azote totale appliquée (kg N ha ⁻¹) ¹							PPDS ⁴	ETM ⁵	F _{TRAIT} ⁶
			20	50	100	150	200	250	250_sat ²			
			Concentration en N (g kg ⁻¹ MS)									
2004	30-juil	1285	11,9	17,0	17,9	23,8	23,0	24,0	19,5	4,57	1,86	***
	05-août	1416	9,7	13,0	18,8	19,0	18,3	19,9	17,4	3,53	1,44	***
	11-août	1537	9,7	11,1	15,4	16,0	16,7	18,1	15,0	3,21	1,310	***
	20-août	1727	6,1	11,1	10,7	13,9	13,5	14,7	12,1	3,72	1,52	**
	25-août	1790	6,2	7,9	11,2	13,0	14,1	14,9	11,7	ND ⁷	0,84 (0,99) ⁸	***
2005	11-juil	1084	23,9	29,5	31,9	32,2	32,8	34,4	33,2	1,55	0,63	***
	18-juil	1265	14,2	16,8	20,9	22,2	22,4	26,5	22,0	2,53	1,03	***
	25-juil	1433	10,7	12,9	19,6	20,9	21,5	22,0	17,6	3,16	1,29	***

¹ : Chaque parcelle a reçu 20 kg N ha⁻¹ au semis et le reste de la dose a été appliqué le 9 juillet en 2004 et le 27 juin en 2005.

² : 250_sat correspond à la parcelle saturée, c'est-à-dire ayant reçu la totalité de la dose (250 kg N ha⁻¹) au semis.

³ : Unité thermique maïs cumulée à partir du semis.

⁴ : Plus petite différence significative.

⁵ : Écart type de la moyenne.

⁶ : Les valeurs de F_{TRAIT} sont significatives à ** : 0,05 ou *** : < 0,01.

⁷ : PPDS non déterminée car une donnée était manquante.

⁸ : La valeur de l'ETM de 0,99 s'applique uniquement au traitement de 50 kg N ha⁻¹ car une donnée était manquante.

Tableau 6.5. Concentration en azote du maïs fertilisé avec différentes doses d'azote aux sites de St-Louis (2004 et 2005)

Année	Date d'échantillonnage	UTM ³	Dose d'azote totale appliquée (kg N ha ⁻¹) ¹							PPDS ⁴	ETM ⁵	F _{TRAIT} ⁶
			20	50	100	150	200	250	250_sat ²			
			Concentration en N (g kg ⁻¹ MS)									
2004	06-juil	976	29,6	31,3	29,0	30,0	28,9	29,6	38,7	2,93	1,19	***
	13-juil	1149	20,7	23,0	23,1	25,0	23,4	24,9	29,2	2,19	0,89	***
	20-juil	1334	13,6	17,9	18,1	20,0	19,1	20,1	23,0	1,84	0,75	***
	27-juil	1494	10,2	15,2	15,1	16,2	18,5	18,1	19,9	2,23	0,91	***
	02-août	1656	8,2	11,8	14,2	14,6	14,3	14,7	15,5	1,62	0,66	***
	09-août	1802	8,7	8,7	11,8	13,5	13,3	16,3	14,2	2,49	1,01	***
2005	06-juil	1034	17,5	21,9	24,1	27,1	25,8	26,3	31,8	3,14	1,28	***
	13-juil	1206	13,1	18,6	21,0	21,9	23,0	22,0	24,0	2,20	0,90	***
	20-juil	1410	10,1	13,2	16,0	18,2	17,7	16,1	19,1	2,49	1,02	***
	27-juil	1579	8,5	10,3	12,2	12,2	15,0	13,6	16,1	1,73	0,71	***

¹: Chaque parcelle a reçu 20 kg N ha⁻¹ au semis et le reste de la dose a été appliqué le 7 juillet en 2004 et le 21 juin en 2005.

²: 250_sat correspond à la parcelle saturée, c'est-à-dire ayant reçu la totalité de la dose (250 kg N ha⁻¹) au semis.

³: Unité thermique maïs cumulée à partir du semis.

⁴: Plus petite différence significative.

⁵: Écart type de la moyenne.

⁶: Les valeurs de F_{TRAIT} sont significatives à *** : < 0,01.

Tableau 6.6. Concentration en azote du maïs fertilisé avec différentes doses d'azote aux sites de la ferme expérimentale de L'Acadie (2004 et 2005)

Année	Date d'échantillonnage	UTM ²	Dose d'azote totale appliquée (kg N ha ⁻¹) ¹				PPDS ³	ETM ⁴	F _{TRAIT} ⁵
			20	73	125	178			
			Concentration en N (g kg ⁻¹ MS)						
2004	06-juil	960	22,8	26,1	27,5	26,8	2,71	1,05	**
	14-juil	1168	18,8	23,2	22,3	25,0	2,55	0,98	**
	23-juil	1410	16,5	19,6	21,6	20,3	1,71	0,66	***
	30-juil	1569	11,3	15,0	17,3	17,1	1,17	0,45	***
	04-août	1701	12,2	15,0	16,5	16,5	2,08	0,80	**
			30	83	135	188			
2005	07-juil	1145	21,7	22,7	25,9	24,6	4,01	1,55	NS
	14-juil	1329	16,9	21,6	22,3	24,2	2,51	0,97	***
	21-juil	1532	14,2	16,7	20,0	20,8	2,54	0,98	***
	28-juil	1700	12,1	14,3	17,4	16,8	2,16	0,84	***

¹ : Chaque parcelle a reçu 20 kg (2004) et 30 kg (2005) N ha⁻¹ au semis et le reste de la dose a été appliqué le 28 juin en 2004 et le 23 juin en 2005.

² : Unité thermique maïs cumulé à partir du semis.

³ : Plus petite différence significative.

⁴ : Écart type de la moyenne.

⁵ : Les valeurs de F_{TRAIT} sont significatives à ** : 0,05, *** : < 0,01 ou non significative : NS.

6.1.2. Validation du modèle de la teneur critique en azote de Plénet et Lemaire

Les données recueillies ont révélé que la teneur en N de la biomasse aérienne diminuait durant la saison de croissance, donc avec une augmentation de la biomasse. Ce phénomène de dilution de la teneur en N avec le temps ou l'augmentation de la biomasse des plantes a été observée pour plusieurs espèces (Justes et al., 1994 ; Bélanger et al., 2001b), incluant le maïs (Plénet et Lemaire, 2000 ; Herrmann et Taube, 2004).

Afin de valider l'équation de la courbe de Plénet et Lemaire (2000) pour le maïs sous les conditions pédoclimatiques du Québec, les données disponibles ont été classées en deux groupes, soit un correspondant à des conditions limitantes pour la croissance des plantes et un où les conditions de croissance étaient non limitantes. Ces deux groupes ont été déterminés par une analyse de la variance suivie du test de la PPDS au seuil $\alpha = 0,10$ pour la biomasse aérienne, tel que décrit dans la section «Matériel et méthodes». Les traitements limitants et non limitants semblent être bien distingués par la courbe de la teneur en N critique déjà établie de Plénet et Lemaire (2000 ; Fig. 6.1).

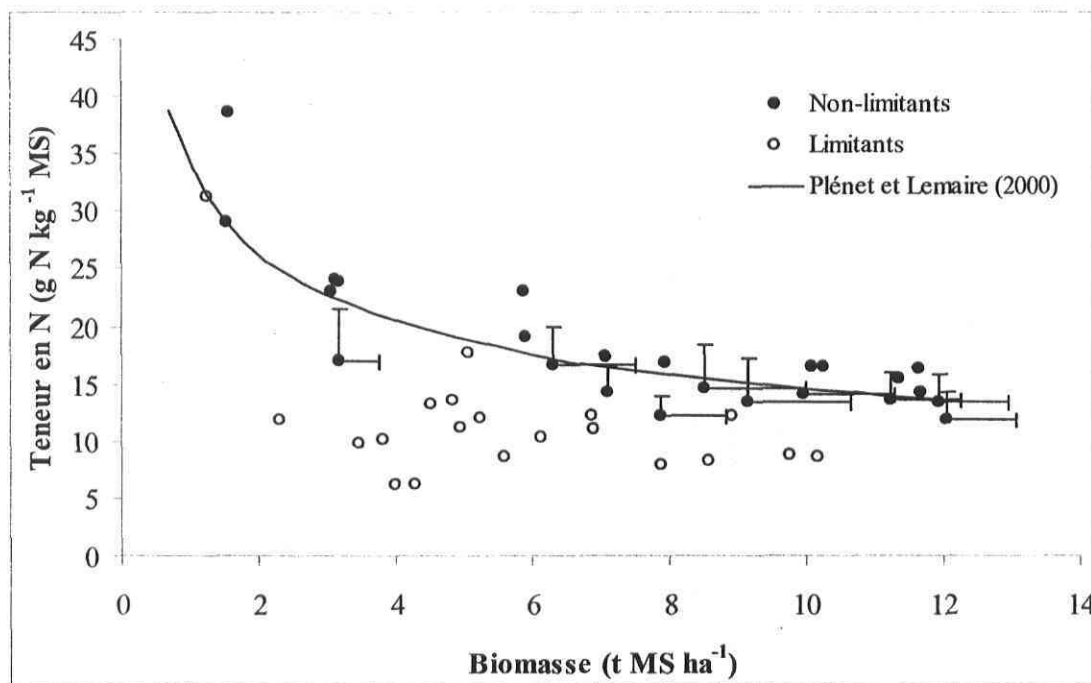


Figure 6.1. Validation du modèle de la teneur en azote (N) critique de Plénet et Lemaire (2000). Barre verticale : plus petite différence significative de la teneur en N. Barre horizontale : plus petite différence significative de la biomasse.

En observant le graphique de la validation de la courbe de Plénet et Lemaire (2000), il est possible de constater que tous les cercles vides, c'est-à-dire les points expérimentaux considérés limitants pour la croissance des plantes, sont situés sous la courbe à valider, ce qui confirme que les doses de N correspondant à ces points étaient insuffisantes pour assurer la croissance maximale des plantes. Pour ce qui est des cercles pleins, c'est-à-dire les points expérimentaux considérés non limitants pour la croissance des plantes, les points sont majoritairement situés au-dessus de la courbe à valider, bien que quelques-uns soient sous celle-ci. Afin de s'assurer que ces derniers sont effectivement non limitants, la valeur de la plus petite différence significative a été ajoutée à la teneur en N mesurée dans la plante. En incluant ainsi la marge d'erreur, il est possible d'affirmer que les points sous la courbe sont majoritairement non limitants et que le fait qu'ils se retrouvent à cet endroit est seulement dû à la variabilité.

Les tableaux 6.7 et 6.8 présentent les doses, non limitantes et limitantes, utilisées pour valider la courbe de Plénet et Lemaire (2000) et permettent de voir que, de 10 points classés comme étant non limitants et étant sous la courbe (surlignés dans la colonne «azote (N)»), on passe à seulement 3 points, soit les traitements de 50 kg N ha⁻¹ du 30 juillet 2004 et de 200 kg N ha⁻¹ du 25 août 2004 à St-Basile et le traitement de 150 kg N ha⁻¹ du 27 juillet 2005 à St-Louis, qui seraient réellement limitants (surlignés dans la colonne «N + PPDS»), donc qui auraient été mal classés par le test statistique. Ceci représente 12,5 % de points mal classés.

Toutefois, si on ajoute aussi la PPDS sur la biomasse aérienne, les deux traitements de St-Basile deviendraient non limitants. Ainsi, un seul point aurait été mal classé par le test statistique, ce qui représente seulement 4,2 % de l'ensemble des points. Ceci permet de confirmer la validité de l'équation de la courbe définie par Plénet et Lemaire (2000) pour le maïs en France et ce, sous les conditions pédoclimatiques du Québec. Celle-ci permet de bien faire la distinction entre les traitements limitants et non limitants pour la croissance des plantes. Sa fiabilité a d'ailleurs aussi été confirmée dans plusieurs environnements et pour différents cultivars en Allemagne et en Australie (Herrmann et Taube, 2004 ; Lemaire et al., 2006). Elle a donc été utilisée pour le calcul des INA dans cette étude.

Le faible nombre de points utilisés pour la validation de la courbe est dû au fait que seules les dates où le test de la PPDS détectait des différences significatives entre les traitements

ont été utilisées. Différentes raisons peuvent expliquer l'absence de différences entre les traitements.

Tout d'abord, plusieurs des dates éliminées étaient au début de la saison lorsque les biomasses aériennes des plantes étaient faibles (1 à 2 t MS ha⁻¹). Ce phénomène de début de saison pourrait être expliqué par le fait que tous les traitements ont reçu la même dose au semis (20 kg) et qu'ils ont seulement été différenciés au stade V8, ce qui correspondait à une courte période de temps avant ces premières dates d'échantillonnage. Le fertilisant appliqué n'avait alors probablement pas encore eu le temps d'avoir un effet sur la croissance des plantes. Toutefois, dans bien des cas, des différences significatives étaient présentes entre les traitements au niveau de la teneur en N de la biomasse, les traitements les plus faibles ayant des teneurs en N plus faibles et inversement pour les traitements les plus élevés. Ceci permet de croire que l'azote avait bel et bien été absorbé par les plantes. L'absence de différence pour la biomasse aérienne pourrait être dû aux conditions climatiques présentes (températures plus fraîches) en début de saison, lesquelles auraient réduit l'impact de la fertilisation sur la croissance à ces stades précoces, ne permettant pas encore de distinguer les différents traitements.

Une autre cause pouvant expliquer l'absence de différences significative est la grande variabilité intra traitement. En effet, cette variabilité provoquait une augmentation des valeurs de PPDS trouvées par le test statistique utilisé (PPDS protégée), empêchant donc de distinguer des différences possibles entre les traitements. En effet, dans plusieurs cas les traitements les plus faibles semblent être plutôt limitants, tandis que les traitements les plus élevés semblent bien pourvus en azote tel que démontré dans l'exemple du 30 juillet 2004 au site de L'Acadie (Fig. 6.2).

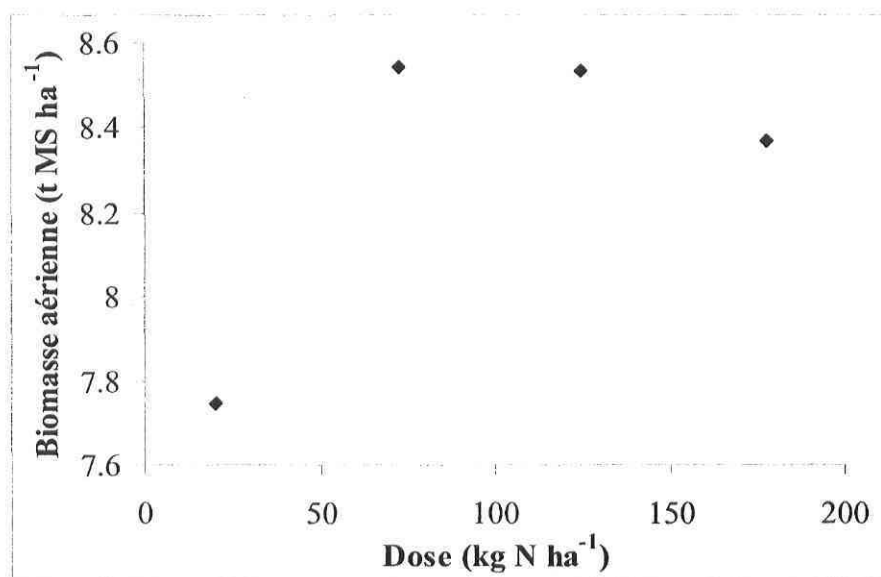


Figure 6.2. Relation entre la biomasse aérienne et la dose d'azote appliquée (L'Acadie, 30 juillet 2004).

Tableau 6.7. Doses non limitantes utilisées pour la validation de la courbe de la teneur en N critique

Sites	Date	Dose (kg N ha ⁻¹)	Biomasse (t ha ⁻¹)	PPDS N ¹	Azote (g N kg ⁻¹ MS)	N + PPDS (g N kg ⁻¹ MS)	Nc ²
St-Basile 2004	30 juillet	50	3,18	4,57	16,97	21,54	22,15
		150	3,19	4,57	23,81	28,38	22,14
		200	3,07	4,57	23,03	27,59	22,45
		250	3,13	4,57	24,00	28,57	22,28
	11 août	200	6,31	3,21	16,67	19,88	17,19
	20 août	200	9,18	3,72	13,48	17,20	14,97
		250	8,53	3,72	14,66	18,39	15,38
25 août	200	9,97	ND	14,11	14,11	14,52	
St-Louis 2004	6 juillet	100	1,54	2,93	29,03	31,95	28,95
		250_sat	1,57	2,93	38,72	41,65	28,75
	20 juillet	250_sat	5,86	1,84	22,97	24,80	17,67
	2 août	250_sat	11,38	1,62	15,54	17,16	13,83
	9 août	100	12,07	2,49	11,84	14,32	13,53
		150	11,25	2,49	13,50	15,99	13,89
		200	11,96	2,49	13,34	15,83	13,58
250		11,66	2,49	16,28	18,77	13,70	
250_sat	11,70	2,49	14,19	16,67	13,69		
L'Acadie 2004	4 août	125	10,28	2,08	16,50	18,57	14,36
		178	10,10	2,08	16,51	18,58	14,45
St-Louis 2005	20 juillet	250_sat	5,89	2,49	19,06	21,55	17,64
	27 juillet	150	7,89	1,73	12,22	13,95	15,83
L'Acadie 2005	28 juillet	83	7,11	2,16	14,26	16,42	16,46
		135	7,08	2,16	17,37	19,53	16,48
		188	7,95	2,16	16,84	19,01	15,79

... : Valeurs de N mal classées par l'analyse statistique par rapport à la courbe de Plénet et Lemaire (2000).

¹ : Plus petite différence significative pour la teneur en N de la biomasse.

² : Teneur en azote critique dans la plante calculée selon l'équation de la courbe de Plénet et Lemaire (2000; $Nc=34W^{-0.37}$)

Tableau 6.8. Doses limitantes utilisées pour la validation de la courbe de la teneur en N critique

Sites	Date	Dose (kg N ha ⁻¹)	Biomasse (t MS ha ⁻¹)	Azote (g N kg ⁻¹ MS)	Nc ¹
St-Basile 2004	30 juillet	20	2,30	11,91	24,98
		50	3,46	9,74	21,49
	11 août	20	4,96	11,09	18,81
		50	3,98	6,10	20,39
	20 août	20	6,92	11,06	16,62
		50	4,29	6,16	19,83
St-Louis 2004	6 juillet	20	7,90	7,85	15,83
		50	1,24	31,33	31,39
	20 juillet	20	4,84	13,61	18,97
		50	8,59	8,18	15,35
	2 août	20	9,77	8,69	14,63
		50	10,18	8,65	14,41
L'Acadie 2004	4 août	20	8,92	12,24	15,13
St-Louis 2005	20 juillet	20	3,83	10,08	20,68
		50	4,52	13,23	19,46
		200	5,07	17,70	18,64
	27 juillet	20	5,60	8,53	17,98
		50	6,13	10,30	17,38
		100	6,88	12,17	16,65
L'Acadie 2005	28 juillet	30	5,25	12,04	18,41

¹ : Teneur en N critique dans la plante calculée selon l'équation du modèle de Plénet et Lemaire ($Nc=34W^{-0,37}$; 2000)

6.2. Indice de nutrition azotée (INA)

6.2.1. Effet de la fertilisation azotée sur l'indice de nutrition azotée

Suite à la validation de la courbe de la teneur en N critique, il a été possible de calculer les valeurs de N critique à l'aide de l'équation : $Nc = 34W^{-0,37}$, où le W correspondait à la biomasse sèche des plantes entières. Par la suite, les indices de nutrition azotée ont pu être déterminés pour chaque date et site (Tableaux 6.9 à 6.11).

Les INA calculés variaient entre 0,30 et 1,35 selon le traitement, la date d'échantillonnage, le site et l'année. L'analyse de la variance a révélé un effet fortement significatif de la dose d'azote (F_{TRAIT}) sur les valeurs de l'INA durant toute la saison de croissance à l'exception de deux dates pour les sites de L'Acadie en 2004 et 2005 .

De plus, les effets linéaire et quadratique des contrastes nous permettent de confirmer que l'INA augmente avec l'augmentation de la dose de N jusqu'à un plateau. Une tendance à la diminution de l'INA lorsque la dose de N est trop élevée est aussi observée (Tableau 6.12). Ceci confirme l'hypothèse de départ affirmant que l'INA fournit un diagnostic fiable de la nutrition azotée chez le maïs, tel que démontré par Plénet et Lemaire (2000).

Tableau 6.9. Indice de nutrition azotée (INA) du maïs fertilisé avec différentes doses d'azote aux sites de la région de Portneuf (St-Basile, 2004 et Ste-Catherine, 2005)

Année	Dates d'échantillonnage	UTM ³	Dose d'azote totale appliquée (kg N ha ⁻¹) ¹							PPDS ⁴	ETM ⁵	F _{TRAIT} ⁶
			20	50	100	150	200	250	250_sat ²			
2004	30-juil	1285	0,48	0,77	0,78	1,07	1,02	1,08	0,81	0,205	0,084	***
	05-août	1416	0,44	0,71	0,99	1,02	0,99	1,04	0,85	0,188	0,077	***
	11-août	1537	0,44	0,59	0,87	0,90	0,97	1,01	0,81	0,183	0,075	***
	20-août	1727	0,30	0,65	0,67	0,88	0,89	0,95	0,74	0,217	0,089	***
	25-août	1790	0,31	0,51	0,73	0,86	0,97	0,99	0,72	ND ⁷	0,062 (0,072) ⁸	***
2005	11-juil	1084	0,70	0,93	1,02	1,04	1,05	1,12	1,03	ND	0,034 (0,039) ⁹	***
	18-juil	1265	0,58	0,78	0,93	0,97	1,03	1,16	0,98	0,129	0,053	***
	25-juil	1433	0,52	0,70	1,11	1,21	1,25	1,12	0,95	0,205	0,084	***

¹: Chaque parcelle a reçu 20 kg N ha⁻¹ au semis et le reste de la dose a été appliqué le 9 juillet en 2004 et le 27 juin en 2005.

²: 250_sat correspond à la parcelle saturée, c'est-à-dire ayant reçu la totalité de la dose (250 kg N ha⁻¹) au semis.

³: Unité thermique maïs cumulée à partir du semis.

⁴: Plus petite différence significative.

⁵: Écart type de la moyenne.

⁶: Les valeurs de F_{TRAIT} sont significatives à *** : < 0,01.

⁷: PPDS non déterminée car une donnée était manquante.

⁸: La valeur de l'ETM de 0,072 s'applique uniquement au traitement de 50 kg N ha⁻¹ car une donnée était manquante.

⁹: La valeur de l'ETM de 0,039 s'applique uniquement au traitement de 100 kg N ha⁻¹ car une donnée était manquante.

Tableau 6.10. Indice de nutrition azotée (INA) du maïs fertilisé avec différentes doses d'azote aux sites de St-Louis (2004 et 2005)

Année	Dates d'échantillonnage	UTM ³	Dose d'azote totale appliquée (kg N ha ⁻¹) ¹							PPDS ⁴	ETM ⁵	F _{TRAIT} ⁶
			20	50	100	150	200	250	250_sat ²			
2004	06-juil	976	0,99	0,99	1,00	1,01	0,97	0,97	1,35	0,118	0,048	***
	13-juil	1149	0,71	0,83	0,82	0,86	0,85	0,85	1,09	0,077	0,032	***
	20-juil	1334	0,72	0,99	0,97	1,07	1,03	1,11	1,30	0,114	0,047	***
	27-juil	1494	0,61	0,95	0,96	0,99	1,14	1,15	1,27	0,147	0,060	***
	02-août	1656	0,54	0,80	0,96	0,99	1,00	1,01	1,12	0,140	0,058	***
	09-août	1802	0,60	0,60	0,88	0,98	0,99	1,19	1,04	0,202	0,083	***
2005	06-juil	1034	0,56	0,73	0,79	0,92	0,88	0,86	1,08	0,115	0,047	***
	13-juil	1206	0,56	0,75	0,91	0,97	1,05	0,97	1,14	0,121	0,050	***
	20-juil	1410	0,49	0,68	0,87	0,99	0,95	0,91	1,08	0,150	0,061	***
	27-juil	1579	0,48	0,59	0,73	0,77	0,93	0,85	0,99	0,119	0,049	***

¹: Chaque parcelle a reçu 20 kg N ha⁻¹ au semis et le reste de la dose a été appliqué le 7 juillet en 2004 et le 21 juin en 2005.

²: 250_sat correspond à la parcelle saturée, c'est-à-dire ayant reçu la totalité de la dose (250 kg ha⁻¹) au semis.

³: Unité thermique maïs cumulée à partir du semis.

⁴: Plus petite différence significative.

⁵: Écart type de la moyenne.

⁶: Les valeurs de F_{TRAIT} sont significatives à *** : < 0,01.

Tableau 6.11. Indice de nutrition azotée (INA) du maïs fertilisé avec différentes doses d'azote aux sites de la ferme expérimentale de L'Acadie (2004 et 2005)

Année	Dates d'échantillonnage	UTM ²	Dose d'azote totale appliquée (kg N ha ⁻¹) ¹				PPDS ³	ETM ⁴	F _{TRAIT} ⁵
			20	73	125	178			
			Indice de nutrition azotée (INA)						
2004	06-juil	960	0,85	1,03	1,10	1,04	0,200	0,079	NS
	14-juil	1168	0,89	1,07	1,05	1,20	0,168	0,067	*
	23-juil	1410	0,95	1,11	1,24	1,19	0,106	0,042	***
	30-juil	1569	0,71	0,98	1,13	1,10	0,104	0,041	***
	04-août	1701	0,81	1,01	1,15	1,14	0,131	0,052	***
			30	83	135	188			
2005	07-juil	1145	0,69	0,76	0,89	0,85	0,131	0,052	NS
	14-juil	1329	0,69	0,97	1,03	1,06	0,142	0,056	***
	21-juil	1532	0,75	0,90	1,10	1,17	ND ⁶	0,056 (0,048) ⁷	***
	28-juil	1700	0,69	0,93	1,12	1,14	ND	0,060 (0,072) ⁸	***

¹ : Chaque parcelle a reçu 20 kg (2004) et 30 kg (2005) N ha⁻¹ au semis et le reste de la dose a été appliqué le 28 juin en 2004 et le 23 juin en 2005.

² : Unité thermique maïs cumulée à partir du semis.

³ : Plus petite différence significative.

⁴ : Écart type de la moyenne.

⁵ : Les valeurs de F_{TRAIT} sont significatives à * : 0,10, *** : < 0,01 ou non significative : NS.

⁶ : PPDS non déterminée car une donnée était manquante.

⁷ : La valeur de l'ETM de 0,048 s'applique uniquement aux traitements de 135 et 188 kg N ha⁻¹ car des données étaient manquantes.

⁸ : La valeur de l'ETM de 0,072 s'applique uniquement au traitement de 135 kg N ha⁻¹ car une donnée était manquante.

Tableau 6.12. Indice de nutrition azotée moyen et contrastes à chaque site pour toute la saison de croissance¹

Site	Dose d'azote totale appliquée (kg N ha ⁻¹) ²							Contrastes ⁴	
	20	50	100	150	200	250	250_sat ³	Linéaire	Quadratique
St-Basile 2004	0,39	0,64	0,81	0,95	0,97	1,01	0,79	***	***
Ste-Catherine 2005	0,60	0,80	1,02	1,07	1,11	1,09	1,01	***	***
St-Louis 2004	0,69	0,86	0,93	0,98	1,00	1,04	1,19	***	NS
St-Louis 2005	0,52	0,68	0,82	0,91	0,95	0,90	1,07	***	***
	20	73	125	178					
L'Acadie 2004	0,84	1,04	1,13	1,13				***	***
	30	83	135	188					
L'Acadie 2005	0,70	0,88	1,02	1,05				***	*

¹: La saison de croissance débute lorsque la biomasse aérienne atteint 1 t MS ha⁻¹ pour le calcul des INA ; la moyenne des valeurs de toutes les dates d'échantillonnage a été calculée.

²: Chaque parcelle a reçu 20 kg N ha⁻¹ au semis et le reste de la dose a été appliqué au stade 8 feuilles.

³: 250_sat correspond à la parcelle saturée, c'est-à-dire ayant reçu la totalité de la dose (250 kg N ha⁻¹) au semis.

⁴: contraste significatif à 0,001 :***, 0,05 :* et non significatif : NS.

6.2.2. Relation entre le rendement relatif et l'indice de nutrition azotée

L'INA est un outil diagnostic permettant d'obtenir une croissance maximale des plantes tout au long de la saison. Puisque l'objectif principal de la culture du maïs-grain est d'obtenir un bon rendement final en grain et non en biomasse végétale, il est aussi très important de mettre en relation l'INA avec le rendement relatif en grains. Le rendement relatif a été calculé en divisant le rendement pour un traitement donné (Y_N) par le rendement maximal obtenu sur le site (Y_{MAX}). Les valeurs obtenues dans cette étude variaient entre 0,34 et 1,00 en fonction du traitement reçu, du site et de l'année (Tableau 6.13). Une augmentation du rendement relatif a été observée avec l'augmentation de la fertilisation azotée. Ces résultats sont comparables à ceux d'autres études effectuées dans l'est du Canada (Isfan et al., 1995, Tran et al., 1997 ; Simard et al., 2001) et au États-Unis (Onken et al., 1985 ; Halvorson et al., 2005).

Tableau 6.13. Rendement relatif à chaque site et année (2004 et 2005)

Sites	Année	Date de récolte	UTM ³	Dose d'azote totale appliquée (kg N ha ⁻¹) ¹							PPDS ⁴	ETM ⁵	
				20	50	100	150	200	250	250_sat ²			
				Rendement relatif (Y _N /Y _{MAX})									
St-Louis	2004	26-oct	3015	0,67	0,83	0,89	0,98	0,98	1,00	0,95	0,056	0,023	
	2005	17-oct	3207	0,44	0,61	0,79	0,95	0,96	0,92	1,00	0,120	0,049	
St-Basile	2004	28-oct	2479	0,34	0,70	0,95	1,00	0,98	1,00	0,97	ND ⁶	0,046 (0,054) ⁷	
Ste-Catherine	2005	26-oct	2870	0,69	0,91	0,94	1,00	0,99	1,00	0,95	0,072	0,029	
L'Acadie	2004	26-oct	3034	20	73	125	178					0,025	0,010
				0,84	0,97	0,99	1,00						
L'Acadie	2005	14-nov	3399	30	83	135	188					0,106	0,041
				0,63	0,83	0,91	1,00						

¹: Chaque parcelle a reçu 20 kg N ha⁻¹ au semis et le reste de la dose a été appliqué au stade 8 feuilles.

²: 250_sat correspond à la parcelle saturée, c'est-à-dire ayant reçu la totalité de la dose (250 kg N ha⁻¹) au semis.

³: Unité thermique maïs cumulée à partir du semis.

⁴: Plus petite différence significative.

⁵: Écart type de la moyenne.

⁶: PPDS non déterminée car une donnée est manquante.

⁷: La valeur de l'ETM de 0,054 s'applique uniquement aux traitements de 100 et 250* kg N ha⁻¹ car des données sont manquantes.

Une régression quadratique a été effectuée avec SAS afin de vérifier s'il existe une relation significative entre ces deux paramètres et ainsi, vérifier s'il est possible de prédire le rendement relatif à partir de l'INA. Tel qu'illustré par la figure 6.3, on peut constater une très bonne relation entre les deux variables, la fonction quadratique expliquant 88 % de la variabilité ($P < 0,001$). De plus, pour un INA supérieur ou égal à 0,95, le rendement relatif est près de 1,0, tandis que lorsque l'INA est inférieur à 0,95, le rendement relatif diminue. Ceci confirme que le modèle de la teneur en N critique de Plénet et Lemaire (2000) et l'INA qu'il permet de calculer permettent de bien identifier les situations de déficience et de suffisance du maïs puisqu'il représente bien le statut nutritif de la plante. Les résultats suggèrent donc que le modèle peut assez bien s'appliquer sous les conditions pédoclimatiques du Québec pour différents cultivars de maïs.

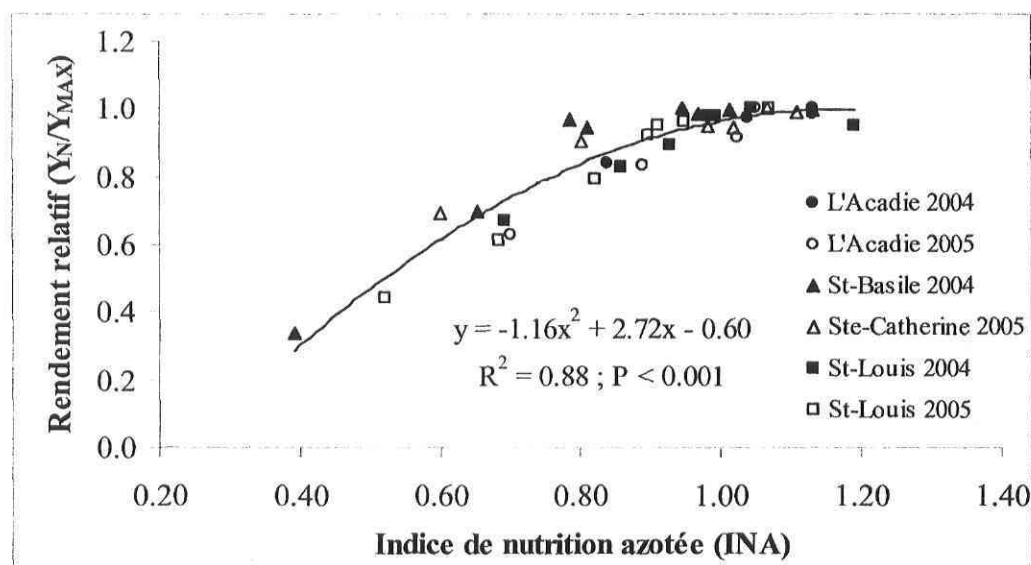


Figure 6.3. Relation entre le rendement relatif et l'indice de nutrition azotée moyen; les données proviennent des différents sites.

En effectuant la relation inverse, c'est-à-dire l'INA en fonction du rendement relatif (Fig. 6.4), il est possible de déterminer quel est l'indice de nutrition azotée nécessaire afin d'obtenir le rendement relatif désiré par le producteur. Ainsi, tel qu'indiqué dans le tableau 6.14, un producteur qui voudrait atteindre un rendement relatif entre 95 et 100 % devrait viser l'obtention d'un INA entre 0,98 et 1,04. Toutefois, en se basant sur les points de la courbe, on peut constater que le même rendement peut être obtenu avec un INA légèrement inférieur.

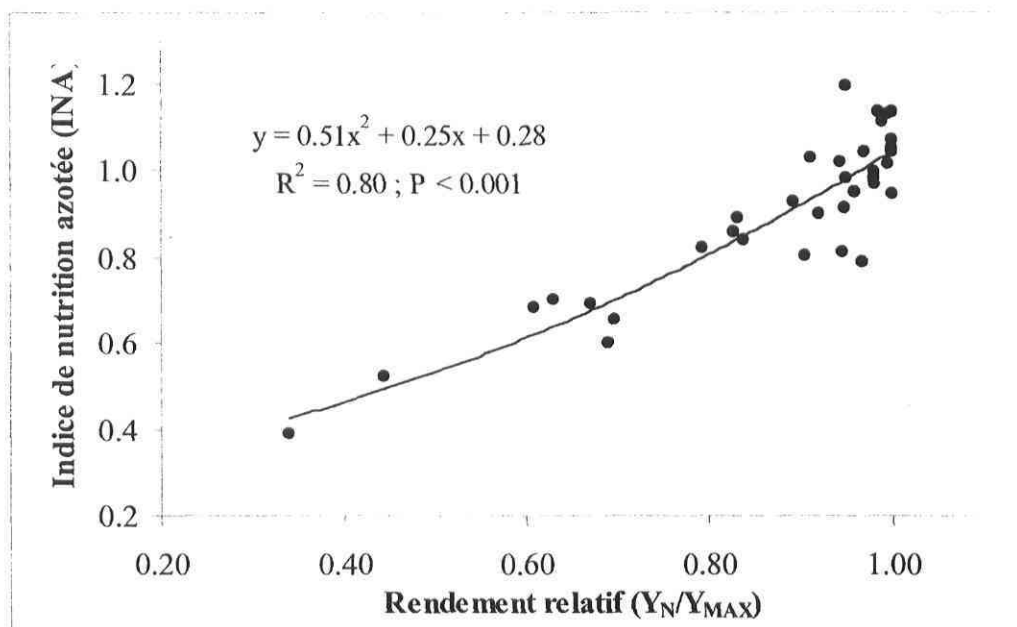


Figure 6.4. Relation entre l'indice de nutrition azotée moyen et le rendement relatif; les données proviennent des différents sites.

Tableau 6.14. Indice de nutrition azotée (INA) nécessaire pour obtenir différents rendements relatifs

Rendement relatif (%)	Indice de Nutrition Azotée (INA)
50	0,53
55	0,57
60	0,61
65	0,66
70	0,70
75	0,75
80	0,81
85	0,86
90	0,92
95	0,98
100	1,04

6.3. Indice de chlorophylle (IC)

6.3.1. Effet de la fertilisation azotée sur l'indice de chlorophylle

Les IC mesurés variaient entre 20,4 et 58,1 selon le traitement, la date d'échantillonnage, le site et l'année (Tableaux 6.15 à 6.17). L'analyse de la variance des lectures de chlorophylle a été effectuée pour chaque site et chaque date d'échantillonnage. Les résultats de celle-ci démontrent un effet fortement significatif des différents traitements azotés (F_{TRAIT}) sur les valeurs de l'IC durant toute la saison de croissance à l'exception d'une date au site de St-Louis en 2004.

L'effet linéaire est fortement significatif pour tous les sites, à l'exception de celui de L'Acadie en 2004. Ceci permet de confirmer que l'IC augmente avec l'augmentation de la dose de N (Tableau 6.18). On constate aussi un léger effet quadratique dans la plupart des cas.

6.3.2. Effet du temps sur l'indice de chlorophylle

Les indices de chlorophylle ont tendance à diminuer en fin de saison et ce, peu importe le traitement reçu, comme le démontre l'exemple du site de L'Acadie en 2004 (Fig. 6.5) où le temps est exprimé par l'accumulation des unités thermiques maïs (UTM). Le déclin des derniers stades est attribuable à la translocation des composés azotés (de la même façon que d'autres minéraux de la feuille) vers l'épi. En effet, les travaux de Peng et al. (1993) montrent que la relation entre l'azote foliaire et les lectures de chlorophylle n'est pas la même selon le stade phénologique. En général, il y a une augmentation des lectures de chlorophylle entre le stade végétatif et le stade reproductif jusqu'à un maximum dépendant de l'espèce, puis les valeurs décroissent graduellement (Costa et al. 2001). Ceci pourrait donc aussi expliquer l'effet quadratique des contrastes existant pour certains sites (Tableau 6.18). Il est donc important de déterminer un IC critique pour un stade précis puisqu'il change en fonction du stade. De plus, il serait aussi impossible d'établir un diagnostic une fois le stade reproductif atteint ce qui, dans le cadre de cette étude importe peu puisque le diagnostic doit être effectué plus tôt en saison afin de pouvoir apporter la deuxième dose d'azote.

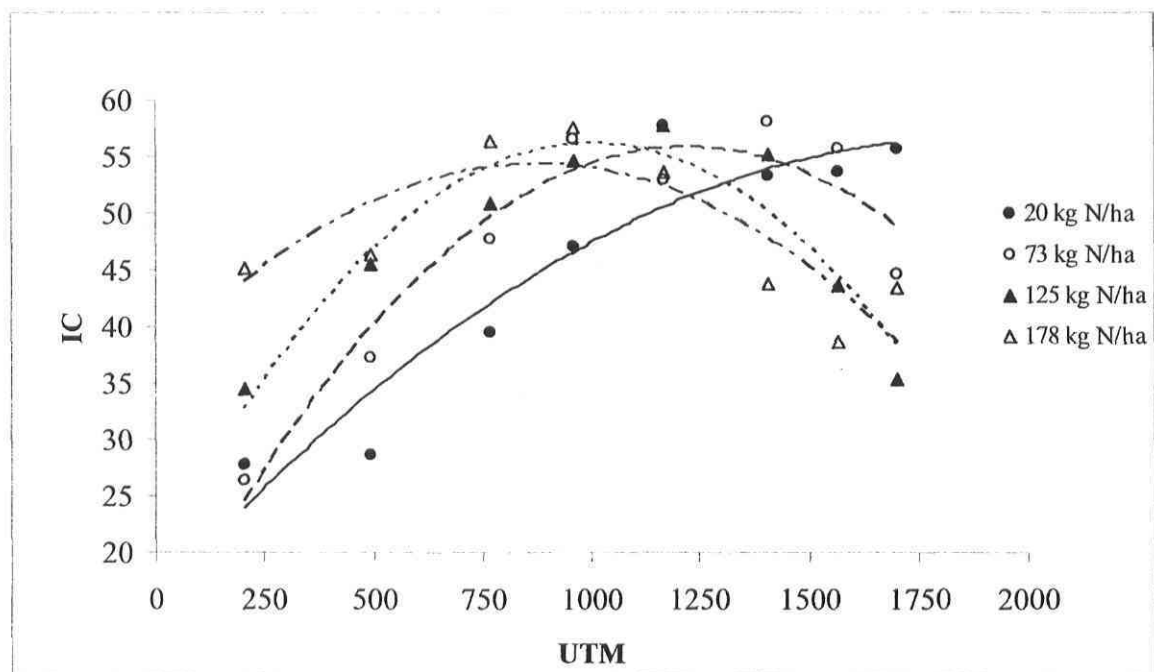


Figure 6.5. Indice de chlorophylle (IC) en fonction des UTM, exemple du site de L'Acadie en 2004.

— Traitement de 20 kg N ha⁻¹. --- Traitement de 73 kg N ha⁻¹.
 Traitement de 125 kg N ha⁻¹. -.- Traitement de 178 kg N ha⁻¹.

Tableau 6.15. Estimation de la chlorophylle du maïs fertilisé avec différentes doses d'azote aux sites de la région de Porneuf (St-Basile, 2004 et Ste-Catherine, 2005)

Année	Date d'échantillonnage	UTM ³	Dose d'azote totale appliquée (kg N ha ⁻¹) ¹							PPDS ⁴	ETM ⁵	F _{TRAIT} ⁶
			20	50	100	150	200	250	250_sat ²			
2004	30-juil	1285	24,3	37,2	42,3	45,9	44,2	46,1	38,8	7,02	2,88	***
	05-août	1416	23,9	36,4	40,7	42,1	41,1	42,0	38,9	5,65	2,32	***
	11-août	1537	20,4	31,5	37,9	38,3	39,6	40,6	36,9	5,15	2,12	***
	20-août	1727	20,8	30,9	39,6	42,9	43,5	43,7	36,9	5,99	2,46	***
	25-août	1790	20,4	31,2	36,6	44,3	44,3	43,0	35,6	5,16	2,12	***
2005	11-juil	1084	34,3	44,6	46,5	44,4	45,6	46,4	46,5	2,77	1,14	***
	18-juil	1265	35,8	46,0	50,3	51,4	51,4	52,3	51,8	1,98	0,82	***
	25-juil	1433	30,5	40,0	43,9	47,9	47,0	48,8	47,2	2,92	1,20	***

¹ : Chaque parcelle a reçu 20 kg N ha⁻¹ au semis et le reste de la dose a été appliqué le 9 juillet en 2004 et le 27 juin en 2005.

² : 250_sat correspond à la parcelle saturée, c'est-à-dire ayant reçu la totalité de la dose (250 kg N ha⁻¹) au semis.

³ : Unité thermique maïs cumulée à partir du semis.

⁴ : Plus petite différence significative.

⁵ : Écart type de la moyenne.

⁶ : Les valeurs de F_{TRAIT} sont significatives à *** : < 0,01.

Tableau 6.16. Estimation de la chlorophylle du maïs fertilisé avec différentes doses d'azote aux sites de St-Louis (2004 et 2005)

Année	Date d'échantillonnage	UTM ³	Dose d'azote totale appliquée (kg N ha ⁻¹) ¹							PPDS ⁴	ETM ⁵	F _{TRAIT} ⁶
			20	50	100	150	200	250	250_sat ²			
2004	06-juil	976	44,2	45,9	43,0	42,7	41,3	42,4	47,6	4,13	1,70	NS
	13-juil	1149	48,5	49,5	47,8	50,4	50,2	50,0	55,8	2,12	0,87	***
	20-juil	1334	43,6	50,7	50,5	51,3	51,7	50,0	50,6	4,19	1,72	**
	27-juil	1494	32,7	41,1	36,5	38,5	43,9	39,4	47,0	5,09	2,09	***
	02-août	1656	40,9	47,1	52,7	51,2	53,2	54,0	54,3	4,86	2,00	***
	09-août	1802	43,1	41,9	53,4	55,9	53,6	56,3	54,0	6,47	2,66	***
2005	06-juil	1034	41,3	44,5	45,7	48,5	48,7	49,3	51,1	3,52	1,45	***
	13-juil	1206	39,7	47,5	49,6	51,0	51,7	50,6	54,1	3,22	1,33	***
	20-juil	1410	40,4	47,1	52,1	54,1	55,0	51,5	53,0	4,52	1,86	***
	27-juil	1579	30,3	35,8	41,5	46,0	46,7	42,7	44,1	5,31	2,18	***

¹ : Chaque parcelle a reçu 20 kg N ha⁻¹ au semis et le reste de la dose a été appliqué le 7 juillet en 2004 et le 21 juin en 2005.

² : 250_sat correspond à la parcelle saturée, c'est-à-dire ayant reçu la totalité de la dose (250 kg N ha⁻¹) au semis.

³ : Unité thermique maïs cumulée à partir du semis.

⁴ : Plus petite différence significative.

⁵ : Écart type de la moyenne.

⁶ : Les valeurs de F_{TRAIT} sont significatives à ** : 0,05, *** : < 0,01 ou non significative : NS.

Tableau 6.17. Estimation de la chlorophylle du maïs fertilisé avec différentes doses d'azote aux sites de la ferme expérimentale de L'Acadie (2004 et 2005)

Année	Date d'échantillonnage	UTM ²	Dose d'azote totale appliquée (kg N ha ⁻¹) ¹				PPDS ³	ETM ⁴	F _{TRAIT} ⁵
			20	73	125	178			
			Lectures de chlorophylle						
2004	06-juil	960	50,9	57,7	56,6	56,2	3,15	1,25	**
	14-juil	1168	52,5	55,6	57,6	58,1	2,45	0,97	**
	23-juil	1410	50,5	53,8	54,8	55,7	2,38	0,94	***
	30-juil	1569	39,8	43,6	46,3	45,6	4,47	1,78	**
	04-août	1701	36,4	39,5	44,5	43,4	4,32	1,71	**
			30	83	135	188			
2005	07-juil	1145	41,8	43,5	46,9	45,6	3,14	1,25	*
	14-juil	1329	37,5	47,9	49,6	49,2	3,37	1,34	***
	21-juil	1532	35,9	43,6	46,8	47,6	4,27	1,69	***
	28-juil	1700	37,8	38,9	42,6	41,0	2,47	0,98	***

¹ : Chaque parcelle a reçu 20 kg N ha⁻¹ au semis et le reste de la dose a été appliqué le 7 juillet en 2004 et le 21 juin en 2005.

² : Unité thermique maïs cumulée à partir du semis.

³ : Plus petite différence significative.

⁴ : Écart type de la moyenne.

⁵ : Les valeurs de F_{TRAIT} sont significatives à * : 0,10, ** : 0,05 ou *** : < 0,01.

Tableau 6.18. Indice de chlorophylle moyen et contrastes à chaque site pour toute la saison de croissance

Site	Dose d'azote totale appliquée (kg N ha ⁻¹) ¹							Contrastes ²	
	20	50	100	150	200	250	250_sat ³	Linéaire	Quadratique
St-Basile 2004	24,9	33,3	37,1	39,1	38,8	38,9	35,3	***	***
Ste-Catherine 2005	32,5	37,1	38,7	39,6	39,1	39,6	40,2	***	*
St-Louis 2004	39,6	42,3	43,4	43,9	44,7	44,4	47,1	**	NS
St-Louis 2005	37,9	40,8	43,7	45,1	45,5	44,4	47,7	***	*
	20	73	125	178					
L'Acadie 2004	42,7	45,4	46,4	46,5				NS	NS
	30	83	135	188					
L'Acadie 2005	39,1	43,6	44,8	43,3				***	***

¹ : Chaque parcelle a reçu 20 kg N ha⁻¹ au semis et le reste de la dose a été appliqué au stade 8 feuilles.

² : Contraste significatif à 0,001 :***, 0,01 :**, 0,05* et non significatif : NS.

³ : 250_sat correspond à la parcelle saturée, c'est-à-dire ayant reçu la totalité de la dose (250 kg N ha⁻¹) au semis.

6.3.3. Relation entre les lectures de chlorophylle et la teneur en N des feuilles

Les lectures de chlorophylle ont été prises sur la dernière feuille complètement déroulée des plantes puisque cette dernière est reconnue pour fournir une bonne estimation de la nutrition azotée de la plante entière. De plus, tel que démontré par Rashid et al. (2004) sur le maïs, il existe une relation significative entre les lectures du SPAD-502 et la teneur en N de cette feuille, ce qui permettrait d'utiliser le lecteur de chlorophylle comme outil diagnostique pour la fertilisation azotée. Afin de s'assurer que cette relation est aussi valide dans les conditions du Québec, la teneur en N des feuilles et les lectures de chlorophylle ont été évaluées pendant toute la saison. Il existe une bonne relation entre les deux variables ($R^2 = 0,75$; $P < 0,001$; Fig. 6.6), ce qui laisse croire que le lecteur de chlorophylle SPAD 502 serait un bon outil diagnostique aux stades V8 à V10.

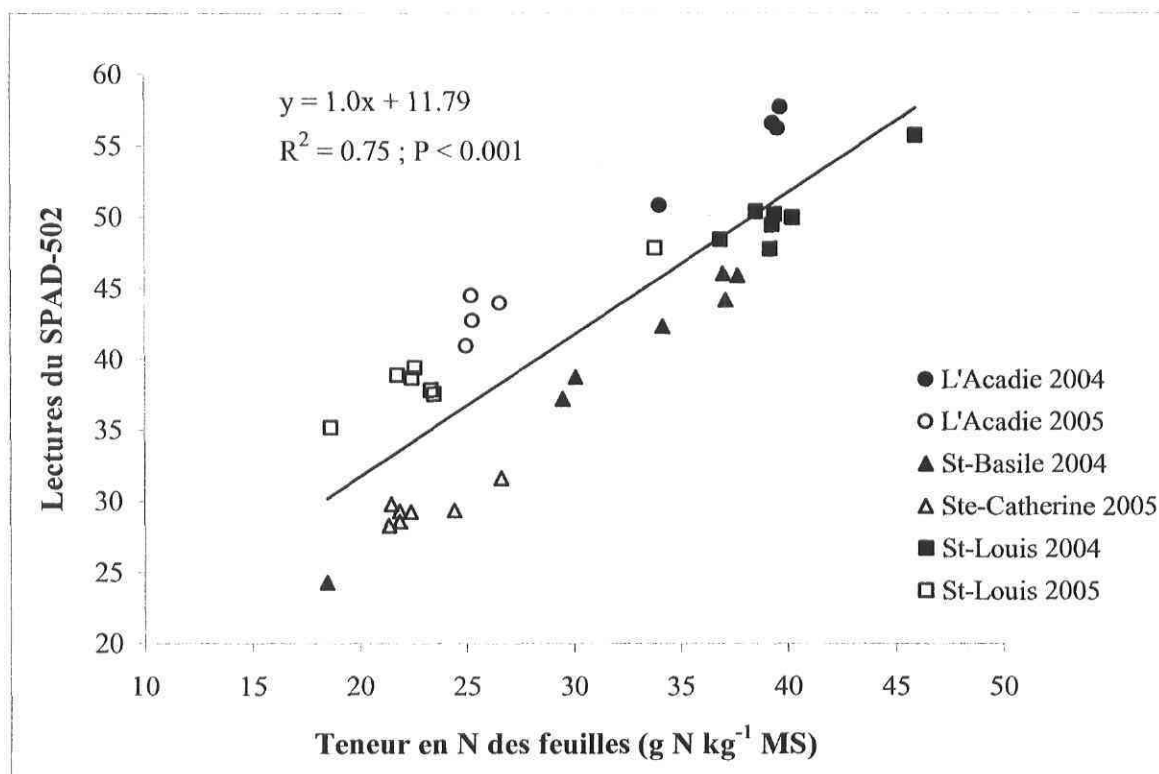


Figure 6.6. Relation entre les lectures de chlorophylle et la teneur en N des feuilles au stade V8 à V10; données provenant de tous les sites.

6.3.4. Relation entre l'indice de chlorophylle et l'indice de nutrition azotée

Le deuxième objectif de cette étude était d'établir la relation entre les lectures de chlorophylle des feuilles et l'indice de nutrition azotée afin de déterminer un indice de chlorophylle critique sous lequel il serait nécessaire d'apporter de l'azote.

La relation obtenue entre les INA et IC obtenus tout au long de la saison est fortement significative ($R^2 = 0,56$) selon l'analyse statistique de la régression quadratique (Fig. 6.7). Il a ensuite été possible de déterminer quelle est la lecture de chlorophylle correspondant à un INA de 1, donc théoriquement optimale pour la croissance des plantes. Cet IC est considéré comme étant l'IC critique. Selon l'équation de la courbe, cet indice critique serait donc de 48,0. Cette valeur est comparable à celles obtenues par différents auteurs. En effet, Piekielek et Fox (1992), Smeal et Zhang (1994) et Rashid et al. (2004) ont obtenu des valeurs critiques d'IC de 43,4, 52,0 et 41,0 respectivement. Toutefois, il est certain qu'il existe une certaine variation (C.V.=18 %) entre les mesures. En effet, les lectures du SPAD-502 varient approximativement entre 40,0 et 57,0 pour un INA de 1,0. Cette variation peut être due à

des facteurs tels que l'hybride de maïs utilisé et le site (texture du sol, conditions climatiques), tel que démontré dans différentes études effectuées par Schepers et al. (1992), Waskom et al. (1996) et Bullock et Anderson (1998).

Afin de vérifier s'il existe des différences significatives entre les sites, des comparaisons de courbes ont été effectuées. Celles-ci ont permis de constater que la relation entre l'IC et l'INA était significativement différente entre les sites et ce, au niveau de l'ordonnée à l'origine des courbes. La figure 6.7 illustre bien ce phénomène à l'aide des courbes des sites de St-Basile en 2004 et de St-Louis en 2005. Celles-ci sont parallèles, toutefois la courbe de St-Basile passe plus bas que celle de St-Louis, illustrant bien les différences qui existent entre les sites. De plus, les valeurs des R^2 sont généralement améliorées par rapport à celle de l'équation moyenne. Ceci se reflète aussi dans la relation entre les lectures du SPAD et la teneur en N des feuilles où les valeurs du site de St-Basile sont aussi plus faibles et celles de St-Louis sont plus élevées que la courbe moyenne, confirmant la différence existant entre les sites.

Suite à cela, il est possible de calculer des IC critique pour obtenir un INA de 1,0 et ce, pour chacun des sites. Ceux-ci varient entre 43,0 et 51,1, confirmant que la relation moyenne n'est pas valide dans toutes les situations. De plus, cet intervalle de valeurs correspond à peu de chose près aux différentes valeurs obtenues dans les études précédemment mentionnées, puisque celles-ci variaient entre 41,0 et 52,0 selon l'étude donc pour différents sites.

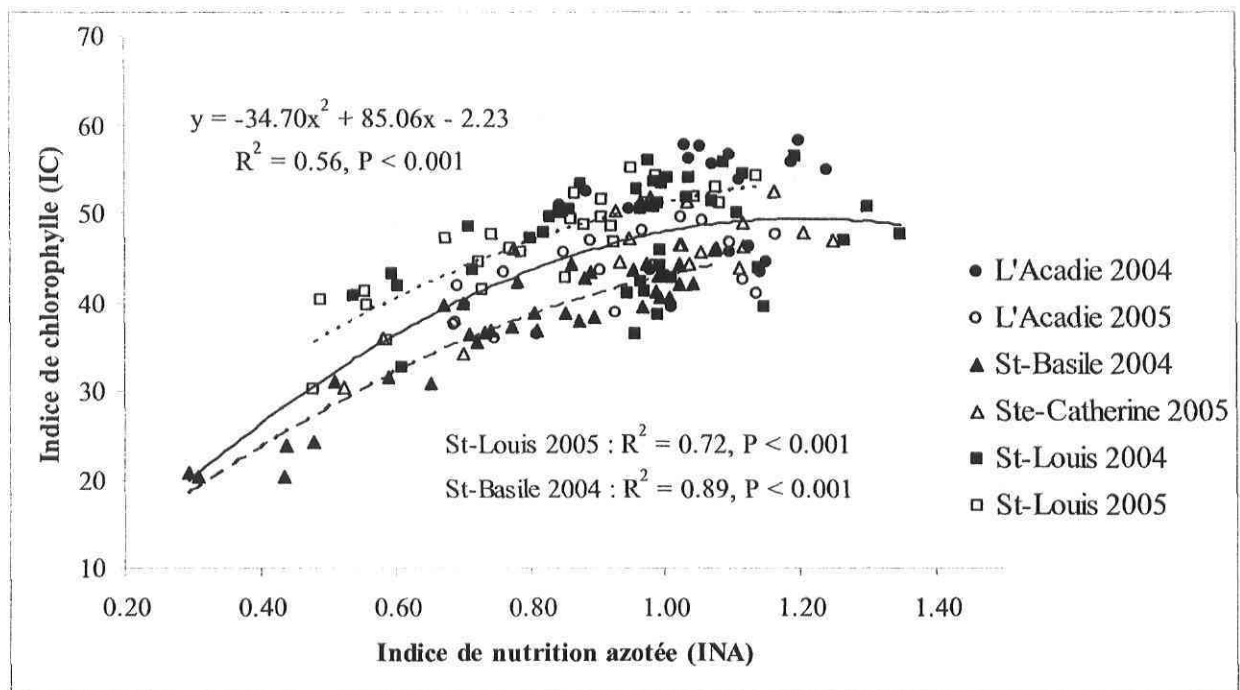


Figure 6.7. Relation entre l'indice de nutrition azotée et l'indice de chlorophylle pour l'ensemble de la saison selon le site. Courbe du site de St-Basile 2004 ———, courbe du site de St-Louis 2005 ———, courbe pour l'ensemble des sites ———.

Cette relation moyenne inclut toutes les dates d'échantillonnage, donc plusieurs stades de croissance des plantes. Différentes études ont démontré que les valeurs évoluent durant la saison selon le stade phénologique (Schepers et al., 1992 ; Waskom et al., 1996 ; Bullock et Anderson, 1998). Il est donc préférable d'établir un indice de chlorophylle critique pour un stade précis, idéalement le stade V8. Puisque l'INA n'était pas nécessairement disponible à ce stade, la relation a été effectuée avec le premier INA disponible pour chaque site, ceci correspondait au stade V8 ou V10 selon le site. Bien que le R^2 soit légèrement inférieur, la relation obtenue est semblable à celle incluant toutes les dates (Fig. 6.8) et est tout aussi significative. L'IC critique calculé à l'aide de l'équation de cette relation est de 47,4 et donc, se rapproche de l'IC obtenu pour la relation incluant toutes les dates. De plus, des comparaisons de courbes ont aussi été effectuées. De la même façon qu'avec toutes les dates, celles-ci ont permis de constater que la relation entre l'IC et l'INA était améliorée lorsque faite pour chaque site individuellement et était significativement différente entre les sites. Ceci confirme que l'équation incluant toutes les dates reflète bien le début de la saison et

qu'il existe des différences significatives entre les sites, rendant difficile l'utilisation d'une valeur unique par tous les producteurs.

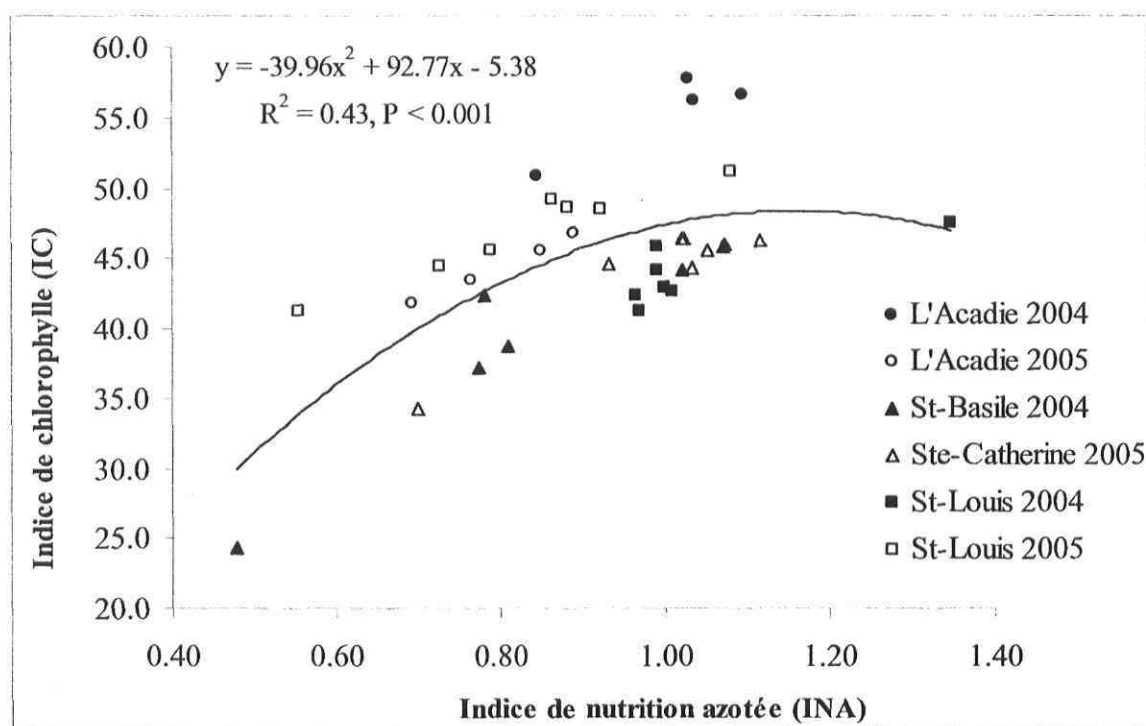


Figure 6.8. Relation entre l'indice de nutrition azotée et l'indice de chlorophylle au stade V8 à V10; données provenant de tous les sites.

6.3.5. Indice de saturation en chlorophylle

Puisque le cultivar, le site, l'année et le climat influencent les lectures de chlorophylle, plusieurs auteurs proposent de normaliser les lectures avec une parcelle de référence adéquatement fertilisée en N afin de tenir compte des différents facteurs de variation, autres que l'azote. Cette parcelle permet de calculer un indice de saturation en chlorophylle en divisant la valeur champ par la valeur saturée. Dans cette étude, des parcelles de saturation, c'est-à-dire ayant reçu une dose de 250 kg N ha⁻¹ au semis, ont été établies à quatre des six sites, soit à St-Basile (2004), Ste-Catherine (2005), et St-Louis (2004-2005). Les données de lectures de chlorophylle pour ces parcelles, qui sont représentées par 250_sat, sont présentées dans les tableaux 6.15 et 6.16. Tout d'abord, on peut constater que pour les sites de St-Basile et Ste-Catherine, les valeurs des parcelles saturées sont le plus souvent inférieures à celles de plusieurs des autres traitements, alors que la parcelle saturée devrait toujours avoir la lecture la plus élevée puisqu'elle a reçu la plus grande quantité d'azote. Ceci est probablement dû au

type de sol, qui est plus sableux et donc, favorise les pertes par lessivage. Les sols à St-Louis étaient plus loameux, par conséquent ils retiendraient un peu mieux l'azote. Les cas de St-Basile et Ste-Catherine sont problématiques puisque certains indices de saturation sont supérieurs à 1, ce qui signifie que la parcelle de saturation n'est pas réellement saturée. On pourrait croire que si on prenait la mesure plus tôt en saison, soit à partir du stade 2 feuilles, les valeurs des parcelles saturées pourraient être plus élevées puisqu'elles étaient les seules à avoir reçu une dose plus élevée d'azote. Dans le cas de Ste-Catherine, la majorité des valeurs des parcelles saturées pour les premières dates d'échantillonnage sont effectivement supérieures aux autres traitements. Au site de St-Basile, certaines des mesures prises dans les parcelles saturées sont toujours inférieures à certains traitements toutefois, cette différence n'est généralement pas significative (Tableau 6.19). Ceci rend tout de même plus difficile l'utilisation de ce type de parcelle pour établir la fertilisation azotée nécessaire.

Tableau 6.19. Estimation des lectures de chlorophylle des sites de la région de Portneuf (2004-2005)

Site	Date	UTM ²	Dose d'azote appliquée (kg N ha ⁻¹) ¹							PPDS ⁴	ETM ⁵
			20	50	100	150	200	250	250_sat ³		
			Lectures de chlorophylle								
St-Basile 2004	18-juin	392	29,0	29,2	29,9	27,7	27,8	27,9	29,0	1,73	0,704
	25-juin	521	29,7	30,0	29,3	30,6	29,0	28,9	28,4	1,81	0,739
	21-juil	1080	31,0	40,0	40,8	41,0	40,8	39,0	37,8	4,93	2,010
Ste-Catherine 2005	13-juin	511	33,9	34,5	34,4	35,2	32,5	35,3	35,7	1,53	0,624
	20-juin	594	30,3	32,5	31,9	33,4	32,9	32,0	30,4	3,28	1,337
	27-juin	750	28,6	29,4	29,3	29,8	29,3	28,3	31,7	2,97	1,210
	4-juil	922	34,1	32,5	34,6	35,1	35,2	34,2	38,6	3,49	1,423

¹ : Chaque parcelle a reçu 20 kg N ha⁻¹ au semis et le reste de la dose a été appliqué au stade 8 feuilles.

² : Unité thermique maïs cumulée à partir du semis.

³ : 250_sat correspond à la parcelle saturée, c'est-à-dire ayant reçu la totalité de la dose (250 kg N ha⁻¹) au semis.

⁴ : Plus petite différence significative.

⁵ : Écart type de la moyenne.

Ces résultats démontrent que l'indice de saturation en chlorophylle calculé à l'aide d'une parcelle saturée est moins efficace pour les sites en sols sableux étant donné que les valeurs d'IC sont souvent plus faibles que celles des autres traitements. Pour ce qui est des sols contenant une plus grande proportion d'argile, l'utilisation de cet indice fournirait une estimation plus précise de la fertilisation azotée des plantes que l'utilisation de l'IC absolu,

tel que démontré par l'exemple du site de St-Louis (Fig. 6.9 et 6.10), ainsi que les résultats de l'analyse statistique de la régression quadratique, où la relation entre l'indice de saturation en chlorophylle et l'INA est meilleure ($R^2 = 0,59$) que celle entre les valeurs absolues de l'IC et l'INA ($R^2 = 0,37$). En effet, la grille de fertilisation basée sur l'indice de saturation développée par Bélec et al. (2006) a été établie en se basant sur des sites de la région de la Montérégie ayant des sols argileux.

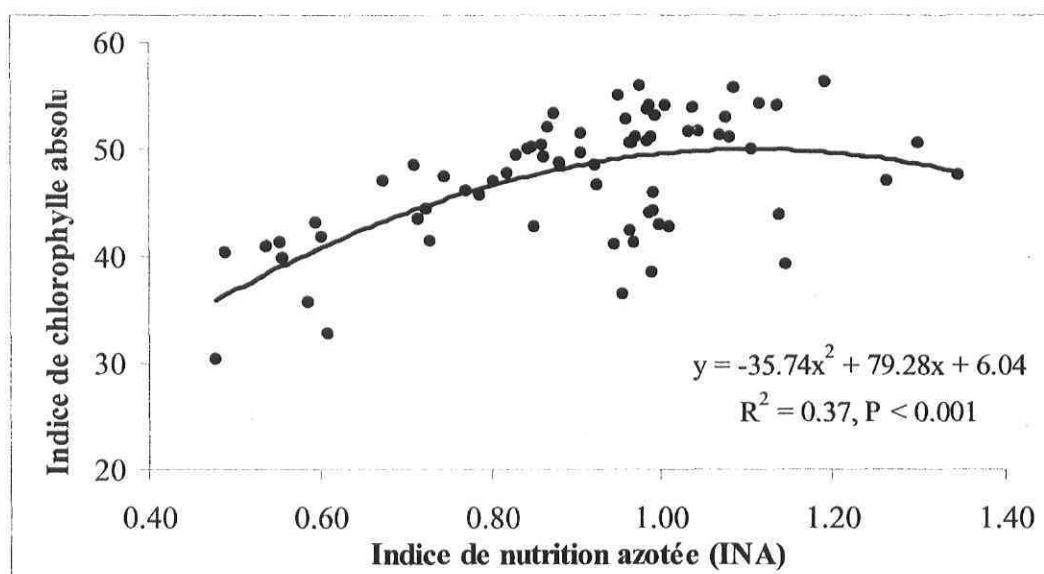


Figure 6.9. Relation entre l'indice de chlorophylle absolu et l'indice de nutrition azotée pour les sites de St-Louis 2004-05.

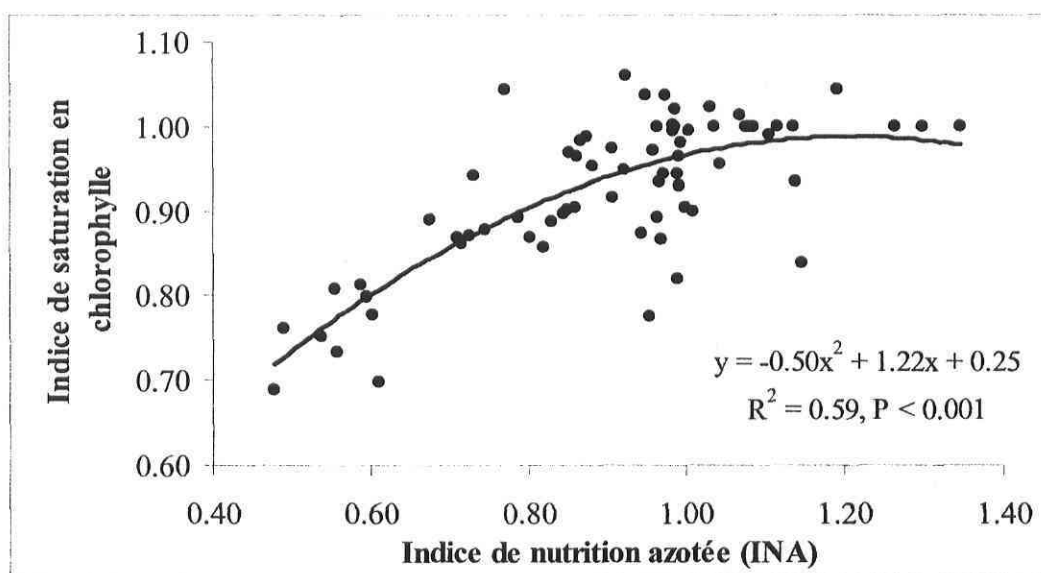


Figure 6.10. Relation entre l'indice de saturation en chlorophylle et l'indice de nutrition azotée pour les sites de St-Louis 2004-05.

Une autre façon de relativiser l'IC serait en comparant la valeur champ à la valeur d'une parcelle témoin sans azote. Toutefois, le traitement témoin utilisé dans cette expérimentation était de 20 kg N ha⁻¹, il ne s'agissait donc pas d'un vrai zéro et il était par conséquent impossible de vérifier cette façon de faire.

En conclusion, ces résultats démontrent que l'indice de saturation en chlorophylle peut être un meilleur outil diagnostique que l'utilisation de l'indice de chlorophylle absolu dans le cas des cultures sur sols loameux ou argileux et relativement homogènes. Ceci implique toutefois d'établir une parcelle saturée dans le champ en question et de faire quelques calculs supplémentaires pour déterminer la bonne dose à ajouter. De plus, cet outil ne serait pas recommandable dans les champs avec un sol sableux.

6.3.6. Indice de chlorophylle vs rendement relatif

Puisqu'il est possible que le rendement maximum soit atteint avec un INA légèrement inférieur à 1, il est intéressant de tenter de déterminer l'IC critique en fonction du rendement relatif plutôt qu'en fonction de l'INA. De plus, ceci permet à chaque producteur de choisir quel rendement relatif il désire atteindre et ce, afin d'obtenir un revenu maximal selon ses coûts de production (90 %, 95 % ou 100 % du rendement maximal par exemple). Pour ce faire il faut tout d'abord vérifier la régression existant entre les deux paramètres (Fig. 6.11).

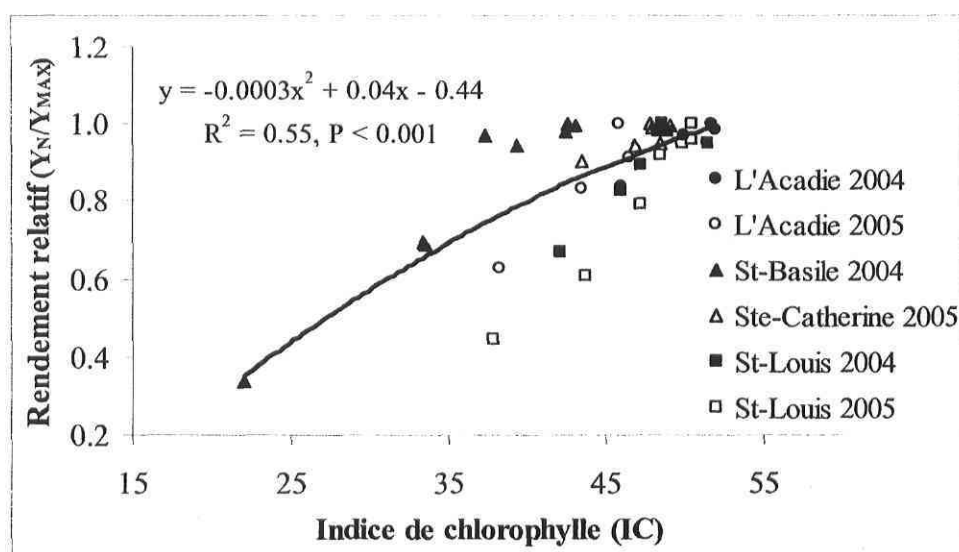


Figure 6.11. Relation entre l'indice de chlorophylle et le rendement relatif; données provenant de tous les sites.

L'analyse statistique démontre que la régression quadratique entre l'IC et le rendement relatif ($R^2 = 0,55$) est très significative ($P < 0,001$; Fig. 6.11). Toutefois, cette relation est faite avec les indices de chlorophylle moyens de toute la saison ce qui rend l'utilisation de cette relation par les producteurs incertaine. En effet, comme il a été mentionné auparavant, les valeurs des lectures de chlorophylle changent durant la saison de croissance (Schepers et al., 1992 ; Waskom et al., 1996 ; Bullock et Anderson, 1998). Ainsi, comme les valeurs utilisées sont des moyennes de toute la saison, elles ne représentent pas nécessairement bien la situation d'un producteur qui prendrait une lecture en début de saison afin de savoir s'il doit ajouter de l'azote pour obtenir un bon rendement relatif.

Toutefois, bien que cette relation ne soit pas utilisable, il est tout de même possible de voir que les points de chacun des différents sites pris individuellement ne suivent pas vraiment bien la courbe établie. Ceci permet donc de confirmer le fait qu'il existe des différences entre les sites, tel que démontré précédemment par la relation entre l'IC et l'INA. De plus, si on calcule les IC critiques à partir des relations existant pour chaque site, on constate que ceux-ci suivent la même tendance que ceux trouvés à partir de la relation entre l'IC et l'INA. En effet, la valeur critique la plus faible est celle du site de St-Basile (2004) avec 41,8, tandis que la plus élevée est celle pour le site de St-Louis (2005) avec 50,8 comparativement à 43,0 pour St-Basile et 51,1 pour St-Louis trouvé avec la relation entre l'IC et l'INA. Ceci pourrait laisser croire que la relation avec les IC moyens est valide, mais qu'il est tout de même nécessaire de faire la relation pour chaque site individuellement. De plus, l'année pourrait aussi être un facteur influençant la relation.

Ces informations permettent d'affirmer que le lecteur de chlorophylle peut être utilisé comme un outil fiable de diagnostic de la nutrition azotée mais ce, à condition d'avoir été testé et calibré sur le site où on veut l'utiliser et pour l'année en cours. Bien que l'IC fournisse une mesure directe et surtout très rapide de la nutrition azotée du maïs, ceci rend difficile l'utilisation du lecteur de chlorophylle par les producteurs puisque l'étude ne permet pas de distinguer l'effet site de l'effet année. Il pourrait toutefois être avantageux d'utiliser le lecteur de chlorophylle chez les producteurs ayant des sols plutôt argileux, car il est à ce moment possible de calculer un IC relatif simplement à l'aide d'une parcelle saturée plutôt que de faire plusieurs parcelles avec différents traitements.

6.4. Nitrates du sol

6.4.1. Effet de la fertilisation azotée sur la teneur en nitrates du sol

En observant les données, on peut constater qu'il existe une très grande variabilité entre les teneurs en nitrates mesurées, celles-ci variant de 0,8 à 254,5 mg NO₃ kg⁻¹ sol (Tableaux 6.20 à 6.22). Cette variabilité peut être due à plusieurs facteurs tels que les différents traitements reçus, le site, la date d'échantillonnage, l'année, les précipitations qui peuvent entraîner des pertes par lessivage et ruissellement et la présence ou l'absence de granules de fertilisant dans l'échantillon de sol prélevé et analysé.

L'analyse de la variance de la teneur en nitrates a été effectuée pour chaque site et chaque date d'échantillonnage. Les résultats de celle-ci démontrent peu ou pas d'effet significatif des différents traitements azotés (F_{TRAIT}) sur les teneurs en nitrates et ce, pour la majorité des sites.

Les contrastes effectués ne démontrent aucun effet linéaire, ni quadratique des traitements sur les teneurs en nitrates et ce pour tous les sites à l'exception de St-Louis en 2004. Ceci indique que la teneur en NO₃ n'augmente pas nécessairement avec une augmentation de la dose d'azote (Tableau 6.23).

6.4.2. Teneur en nitrates du sol vs indice de nutrition azotée

Le troisième objectif de cette étude était d'établir la relation entre l'indice de nutrition azotée et les nitrates du sol afin d'évaluer une teneur en nitrates critique sous laquelle il serait nécessaire d'apporter un supplément d'azote. Pour ce faire, des prélèvements de sol ont été effectués sur 0-15 cm dans la zone d'échantillonnage des plantes tout au long de la saison et ont été analysés pour leur teneur en nitrates. L'analyse statistique des résidus a démontré que les variances n'étaient pas homogènes à toutes les dates. Une transformation logarithmique a donc été effectuée sur les teneurs en nitrates des sites de St-Basile (30 juillet et 5 août), Ste-Catherine (18 et 25 juillet), St-Louis 2004 (6 et 13 juillet) et St-Louis 2005 (toutes les dates). Les données brutes de chacun des sites sont présentées aux tableaux 6.20 à 6.22. De plus, certaines données ont été retirées des analyses à l'aide de SAS, puisqu'elles étaient considérées comme étant aberrantes puisqu'elles ne répondaient pas aux critères d'homogénéité et de normalité de la variance.

Tableau 6.20. Teneur en nitrates du sol (0-15 cm) fertilisé avec différentes doses d'azote aux sites de la région de Portneuf (St-Basile, 2004 et Ste-Catherine, 2005)

Année	Dates d'échantillonnage	UTM ²	Dose d'azote totale appliquée (kg N ha ⁻¹) ¹						PPDS ⁴	ETM ⁵	F _{TRAIT} ⁶	
			20	50	100	150	200	250				250_sat ³
2004	30-juil	1285	30,0	44,6	45,5	45,6	88,8	60,3	39,6	31,35	12,88	*
	05-août	1416	27,1	27,8	38,8	109,1	64,8	49,9	48,3	71,17	29,25	NS
	11-août	1537	29,2	37,6	61,6	56,3	104,6	58,6	30,9	39,26	16,13	*
	20-août	1727	31,1	38,7	25,4	53,3	60,1	48,8	47,0	21,40	8,80	NS
	25-août	1790	28,2	34,5	36,0	40,9	48,9	59,3	35,1	ND	5,92 (6,83) ⁷	NS
2005	11-juil	1084	13,1	14,4	19,0	20,7	22,1	19,4	28,1	ND	3,59 (4,14) ⁸	NS
	18-juil	1265	14,9	11,1	13,6	62,5	13,3	32,3	22,2	45,36	18,64	NS
	25-juil	1433	11,1	11,4	11,5	11,7	85,0	157,0	10,6	64,33	26,44	***

¹: Chaque parcelle a reçu 20 kg N ha⁻¹ au semis et le reste de la dose a été appliqué au stade 8 feuilles.

²: Unité thermique maïs cumulée à partir du semis.

³: 250_sat correspond à la parcelle saturée, c'est-à-dire ayant reçu la totalité de la dose (250 kg N ha⁻¹) au semis.

⁴: Plus petite différence significative.

⁵: Écart type de la moyenne.

⁶: Les valeurs de F_{TRAIT} sont significatives à * : 0,10, *** : < 0,01 ou non significative : NS.

⁷: La valeur de l'ETM de 6,83 s'applique uniquement au traitement de 150 kg N ha⁻¹ car une donnée était manquante.

⁸: La valeur de l'ETM de 4,14 s'applique uniquement au traitement de 150 kg N ha⁻¹ car une donnée était manquante.

Tableau 6.21. Teneur en nitrates du sol (0-15 cm) fertilisé avec différentes doses d'azote aux sites de St-Louis (2004 et 2005)

Année	Dates d'échantillonnage	UTM ²	Dose d'azote totale appliquée (kg N ha ⁻¹) ¹							PPDS ⁴	ETM ⁵	F _{TRAIT} ⁶
			20	50	100	150	200	250	250_sat ³			
2004	06-juil	976	58,5	62,8	55,4	111,0	67,9	80,0	.	46,09	18,80	NS
	13-juil	1149	49,4	84,8	72,5	105,1	138,6	75,1	90,6	80,33	33,01	NS
	20-juil	1334	46,3	70,6	77,0	82,9	65,9	85,9	102,3	ND ⁷	13,27 (15,33) ⁸	NS
	27-juil	1494	46,2	62,8	52,2	53,0	77,6	75,8	62,1	27,04	11,11	NS
	02-août	1656	44,0	47,3	56,3	59,5	68,5	55,8	80,4	20,10	8,26	*
	09-août	1802	38,2	43,3	48,6	49,5	71,2	56,3	70,2	13,62	5,60	***
2005	06-juil	1034	31,6	52,6	30,4	40,0	43,5	56,3	149,2	71,61	29,43	NS
	13-juil	1206	6,7	14,9	66,6	137,0	21,7	254,5	80,5	---	66,34 (76,61) ⁹	NS
	20-juil	1410	6,0	11,6	55,3	139,5	215,9	23,0	44,9	---	79,05 (91,28) ¹⁰	NS
	27-juil	1579	1,0	2,4	0,8	7,1	4,0	16,0	40,2	14,46	5,94	***

¹ : Chaque parcelle a reçu 20 kg N ha⁻¹ au semis et le reste de la dose a été appliqué au stade 8 feuilles.

² : Unité thermique maïs cumulée à partir du semis.

³ : 250_sat correspond à la parcelle saturée, c'est-à-dire ayant reçu la totalité de la dose (250 kg N ha⁻¹) au semis.

⁴ : Plus petite différence significative.

⁵ : Écart type de la moyenne.

⁶ : Les valeurs de F_{TRAIT} sont significatives à * : 0,10, *** : < 0,01 ou non significative : NS.

⁷ : PPDS non déterminé car une donnée était manquante.

⁸ : La valeur de l'ETM de 15,33 s'applique uniquement au traitement de 200 kg N ha⁻¹ car une donnée était manquante.

⁹ : La valeur de l'ETM de 76,61 s'applique uniquement au traitement de 250_sat kg N ha⁻¹ car une donnée était manquante.

¹⁰ : La valeur de l'ETM de 91,28 s'applique uniquement au traitement de 250 kg N ha⁻¹ car une donnée était manquante.

Tableau 6.22. Teneur en nitrates du sol (0-15 cm) fertilisé avec différentes doses d'azote aux sites de la ferme expérimentale de L'Acadie (2004 et 2005)

Année	Dates d'échantillonnage	UTM ²	Dose d'azote totale appliquée (kg N ha ⁻¹) ¹				PPDS ³	ETM ⁴	F _{TRAIT} ⁵
			20	73	125	178			
			Teneur en NO ₃ du sol (mg kg ⁻¹)						
2004	06-juil	960	46,2	46,5	45,7	53,2	23,58	9,35	NS
	14-juil	1168	21,3	29,1	41,8	57,3	17,68	7,01	**
	23-juil	1410	36,0	53,2	46,0	49,7	17,68	7,01	NS
	30-juil	1569	19,5	22,8	33,3	31,0	19,79	7,85	NS
	04-août	1701	29,7	29,5	45,8	47,0	27,51	10,92	NS
			30	83	135	188			
2005	07-juil	1145	20,2	27,1	41,8	34,0	18,15	7,20	NS
	14-juil	1329	33,2	25,2	30,2	40,5	23,18	9,20	NS
	21-juil	1532	17,6	27,5	32,2	26,4	13,98	5,55	NS
	28-juil	1700	---	---	---

¹ : Chaque parcelle a reçu 20 kg N ha⁻¹ en 2004 et 30 kg N ha⁻¹ en 2005 au semis et le reste de la dose a été appliqué au stade 8 feuilles.

² : Unité thermique maïs cumulée à partir du semis.

³ : Plus petite différence significative.

⁴ : Écart type de la moyenne.

⁵ : Les valeurs de F_{TRAIT} sont significatives à ** : 0,05 ou non significative : NS.

Tableau 6.23. Teneur en nitrates moyenne du sol à chaque site et contrastes pour toute la saison de croissance

Site	Dose d'azote totale appliquée (kg N ha ⁻¹) ¹							Contrastes ²	
	20	50	100	150	200	250	250_sat ³	Linéaire	Quadratique
St-Basile 2004	37,5	73,7	63,7	78,9	76,2	59,6	101,2	NS	NS
St-Catherine 2005	22,1	25,8	31,6	38,2	34,3	47,3	102,1	NS	NS
St-Louis 2004	55,8	68,7	65,9	84,2	93,8	75,8	222,1	***	*
St-Louis 2005	38,1	29,9	37,6	63,5	55,0	71,8	75,5	NS	NS
	20	73	125	178					
L'Acadie 2004	55,2	49,4	56,0	62,6				NS	NS
	30	83	135	188					
L'Acadie 2005	32,3	32,2	40,6	38,5				NS	NS

¹ : Chaque parcelle a reçu 20 kg N ha⁻¹ en 2004 et 30 kg N ha⁻¹ en 2005 au semis et le reste de la dose a été appliqué au stade 8 feuilles.

² : Contraste significatif à 0,001 :***, 0,05 :* et non significatif : NS.

³ : 250_sat correspond à la parcelle saturée, c'est-à-dire ayant reçu la totalité de la dose (250 kg N ha⁻¹) au semis.

Différentes régressions (linéaire et quadratique) ont été effectuées entre la teneur en nitrates du sol et l'indice de nutrition azotée afin de vérifier s'il existe une relation entre les deux variables et ce, pour répondre à l'objectif 3. Toutefois, bien que les résultats obtenus démontrent une relation linéaire très significative avec une valeur F de 31,34 ($P < 0,001$), la valeur du R^2 , qui représente la proportion de la variabilité prise en compte par la régression, est seulement de 0,16, ce qui démontre que, bien que significative, la relation entre la teneur en nitrates et l'INA n'est pas très bonne. L'hypothèse de départ, qui affirmait qu'il existe une relation positive entre l'INA et les nitrates du sol est ainsi infirmée. En effet, on constate plutôt que les teneurs en nitrates ont tendance à rester stables et inférieures à 50 mg NO₃ kg⁻¹ sol, jusqu'à ce que l'INA atteigne une valeur située entre 0,80 et 0,85. Par la suite, on remarque une tendance à l'augmentation des nitrates dans le sol (Fig. 6.12). Cette relation entre la teneur en nitrates du sol et l'INA est d'ailleurs confirmée par l'étude de Farruggia et al. (2004), qui a obtenu le même type de relation entre ces deux variables pour les fourrages.

Afin de bien faire la répartition entre ces deux situations et de trouver quelle est la valeur de l'INA qui les sépare, la méthode statistique de Cate-Nelson a été utilisée. Cette méthode indique qu'une valeur d'INA de 0,81 sépare les deux groupes. Ainsi, lorsque les INA sont

faibles ($< 0,81$), les teneurs en nitrates du sol restent plutôt stables à des valeurs inférieures à $50 \text{ mg NO}_3 \text{ kg}^{-1}$, ce qui indique que, tant que la nutrition du maïs n'est pas optimale, celui-ci absorbe une bonne partie de l'azote disponible. Toutefois, lorsque le maïs approche ou atteint sa nutrition optimale, la disponibilité en azote dans le sol est plus élevée que son absorption par la plante et par conséquent, la teneur en nitrates du sol a tendance à augmenter. Ceci augmente donc le risque de perte d'azote dans l'environnement.

Il faut toutefois faire attention puisque l'augmentation des nitrates du sol n'est pas systématique lorsque l'INA est plus élevé. En effet, il arrive que la teneur en NO_3 reste constante et ce, malgré un INA de 1,20. Ceci peut être dû à plusieurs facteurs dont une absorption excessive de l'azote par la plante, ce qui n'est pas souhaitable puisque cela entraîne une dépense inutile en fertilisant. Une autre hypothèse pour ce faible niveau de nitrates du sol est que l'INA élevé a été atteint avec une dose d'azote réduite, donc que le sol était suffisamment pourvu en NO_3 pour combler les besoins de la plante pour sa croissance et n'avait pas besoin d'une fertilisation supplémentaire. Le cas où la teneur en nitrates du sol est très faible au départ est aussi possible, ainsi les faibles doses de N ne permettent pas d'atteindre un INA supérieur à 0,81 tandis que les doses élevées répondent aux besoins de la plante sans excès. Finalement, une autre cause possible est que l'azote supplémentaire a déjà été perdu avant que l'échantillonnage du sol ait eu lieu, que ce soit par lessivage, ruissellement ou érosion, cette situation étant la moins souhaitable et celle que l'on cherche à éviter.

Bien que d'une façon générale, ce phénomène s'applique assez bien à tous les sites, il y a certains endroits où la teneur en NO_3 a tendance à rester assez faible malgré un INA élevé (Ste-Catherine 2005, L'Acadie 2005). Il peut donc y avoir aussi un certain effet du site, qui peut être lié à l'un ou l'autre des facteurs mentionnés précédemment, sur la teneur en nitrates présente dans le sol. Ceci empêche d'établir une relation applicable dans toutes les situations.

Cette relation ne permet donc pas l'établissement d'une valeur critique de nitrates sous laquelle il faudrait apporter une dose supplémentaire d'azote. Elle permet toutefois de comprendre qu'il est important d'être plus prudent sur l'ajout d'azote lorsque l'INA est supérieur à 0,81.

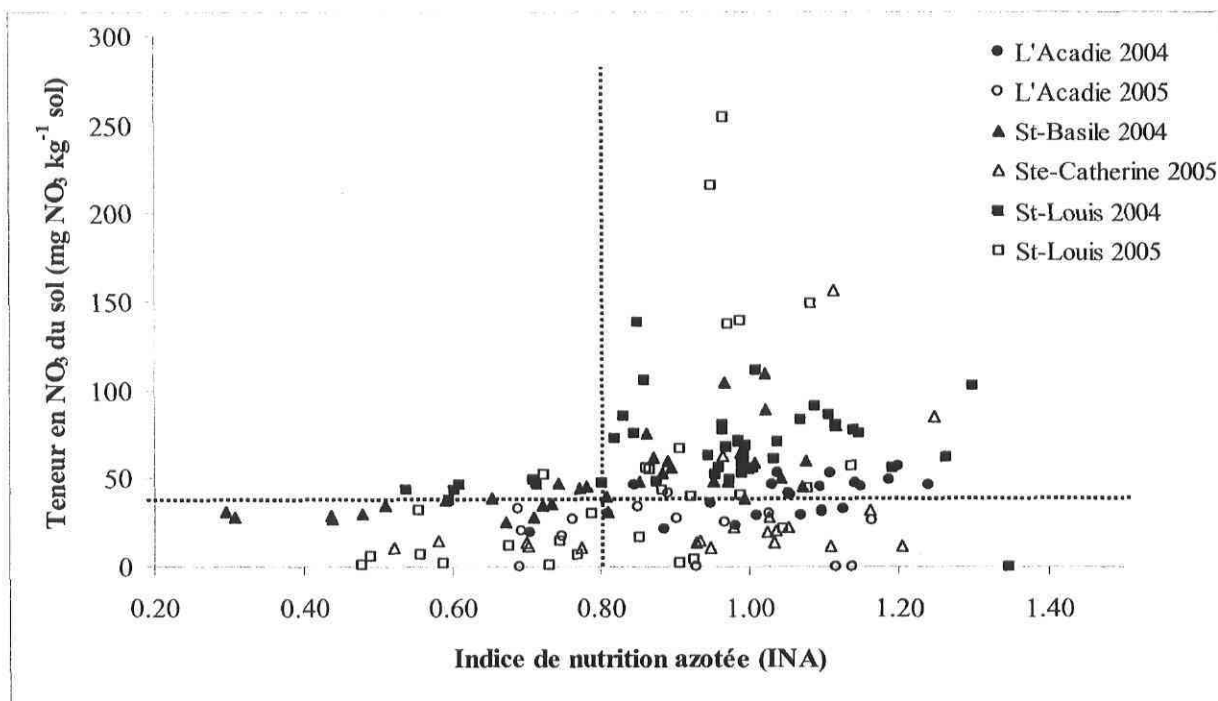


Figure 6.12. Relation entre l'indice de nutrition azotée et la teneur en nitrates du sol à chaque site pour toute la saison.

Comme la relation précédente a été faite à partir des données de toute la saison, il est possible que la relation entre les deux paramètres diffère pour un stade précis en début de saison au moment de faire le diagnostic. Les données disponibles ne permettent toutefois pas d'établir une telle relation pour un stade unique puisque l'INA n'est pas disponible exactement au même stade pour chaque site. La relation a tout de même été faite pour la première date où un INA a pu être mesuré pour chaque site, ce qui correspond aux stades V8 à V10 selon le site (Fig. 6.13). Sur ce graphique, il est possible d'observer le même type de relation que sur le précédent, à l'exception de la valeur d'INA à laquelle les teneurs en nitrates commencent à augmenter. En effet, comme dans le cas précédent, les teneurs en nitrates du sol sont généralement inférieures à $50 \text{ mg NO}_3 \text{ kg}^{-1} \text{ sol}$ pour des INA plus faibles. Toutefois, la valeur d'INA à laquelle l'augmentation de la teneur en NO_3 débute est de 0,97 au lieu de 0,81. Ainsi, un INA inférieur à 0,97 en début de saison, soit à un stade de V8 à V10, diminue les risques d'accumulation de nitrates dans les sols. Cependant puisqu'une teneur en nitrates de $50 \text{ mg NO}_3 \text{ kg sol}^{-1}$ ne permet pas d'avoir une idée précise de l'INA, la relation ne permet pas d'aller plus loin et de déterminer une teneur critique en nitrates.

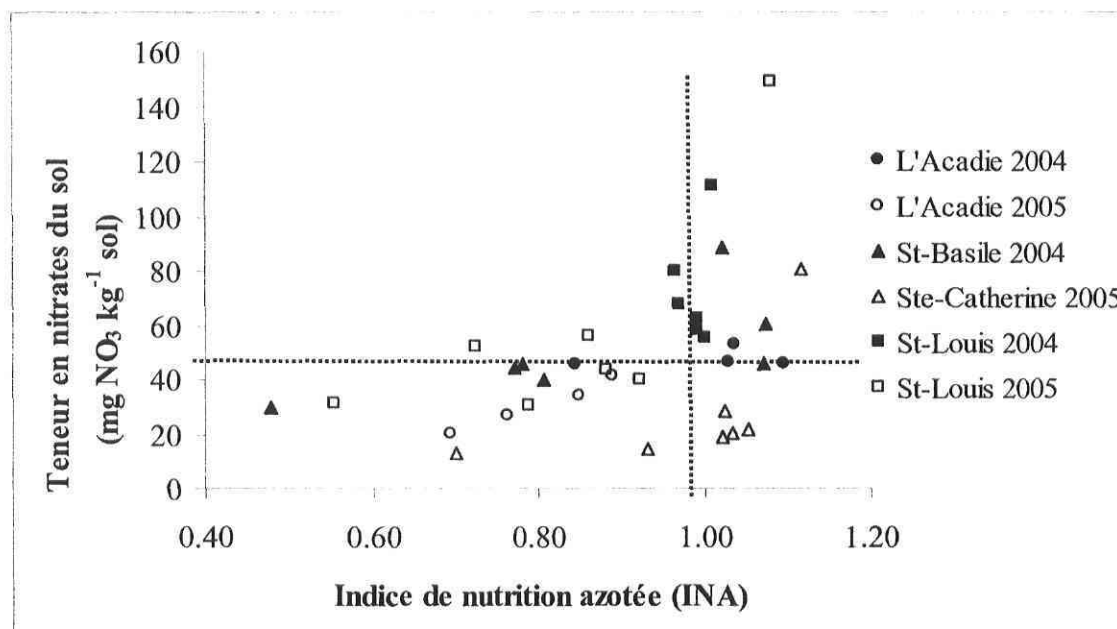


Figure 6.13. Relation entre l'indice de nutrition azotée et la teneur en nitrates du sol en début de saison (stades V8 à V10).

6.4.3. Rendement relatif vs teneur en nitrates du sol

Afin de déterminer une teneur en nitrates critique, sous laquelle il faut apporter un supplément d'azote, en fonction du rendement relatif, plusieurs régressions ont été faites dont la linéaire-plateau. L'analyse statistique démontre que la régression linéaire-plateau entre la teneur en nitrates du sol et le rendement relatif, bien que fortement significative ($P = 0,006$), n'est pas très bonne ($R^2 = 0,27$; Fig. 6.14).

Selon cette relation, la teneur en NO_3 critique serait de $64,5 \text{ mg NO}_3 \text{ kg}^{-1} \text{ sol}$, donc $14,6 \text{ mg N-NO}_3 \text{ Kg}^{-1} \text{ sol}$. Toutefois, le faible coefficient de détermination de cette régression suggère une grande imprécision pour faire un diagnostic. Cette valeur est tout de même assez près, bien que plus faible, de celle de $20 \text{ à } 30 \text{ mg N-NO}_3 \text{ kg}^{-1} \text{ sol}$, établie par Magdoff et al. (1990), ainsi que celle de $33 \text{ mg N-NO}_3 \text{ kg}^{-1} \text{ sol}$, établie par Zebarth et Paul (1997). Il est aussi possible de constater que les différents sites ne suivent pas nécessairement cette relation obtenue pour l'ensemble des sites et la teneur en NO_3 critique de $64,5 \text{ mg NO}_3 \text{ kg}^{-1} \text{ sol}$ n'est pas valable pour chacun des sites. En effet, cette relation semble assez bien s'appliquer aux sites de St-Louis en 2004 et 2005. Toutefois, le rendement relatif de 100% semble être atteint avec des teneurs en nitrate beaucoup plus faibles aux autres sites. Ainsi, avant de conclure que la teneur en NO_3 critique est bel et bien de $64,5 \text{ mg NO}_3 \text{ kg}^{-1} \text{ sol}$, la

relation linéaire-plateau a été faite pour chacun des sites individuellement afin d'obtenir une teneur en nitrates critique beaucoup plus précise pour chacun (Tableau 6.24).

Tableau 6.24. Teneur en nitrates critique pour chaque site

Sites	Teneurs en nitrates critiques (mg NO ₃ kg ⁻¹ sol)
L'Acadie, 2004	37,3
L'Acadie, 2005	28,4
St-Basile, 2004	40,9
Ste-Catherine, 2005	22,6
St-Louis, 2004	70,3
St-Louis, 2005	50,7

Les résultats obtenus démontrent bien que la teneur en nitrates de 64,5 mg NO₃ kg⁻¹ sol surestime dans la majorité des cas la teneur nécessaire pour obtenir un rendement relatif maximum. Ceci confirme que, en plus d'être trop imprécise pour être généralisée, cette valeur risquerait de contribuer à l'augmentation de la teneur en nitrates des sols si elle était utilisée par les producteurs où la teneur critique est plutôt de l'ordre de 30 mg NO₃ kg⁻¹ sol.

Bien que la teneur en nitrates du sol permet de prédire le rendement relatif avec une assez bonne précision pour un site précis, elle n'est toutefois pas assez précise pour être généralisée à tous les sites. Une faible corrélation entre ces deux variables a aussi été observée dans d'autres études (Ziadi et al., 2000 ; Bélanger et al., 2001a) confirmant que la teneur en nitrates n'est pas un outil de diagnostic fiable pour la fertilisation azotée. Pour l'utiliser de façon efficace, il serait nécessaire d'effectuer une calibration sur le site où on veut l'utiliser et ce à chaque année, ce qui n'est pas pratiquement utilisable. De plus, le temps nécessaire pour l'analyse en laboratoire est un inconvénient de cette méthode.

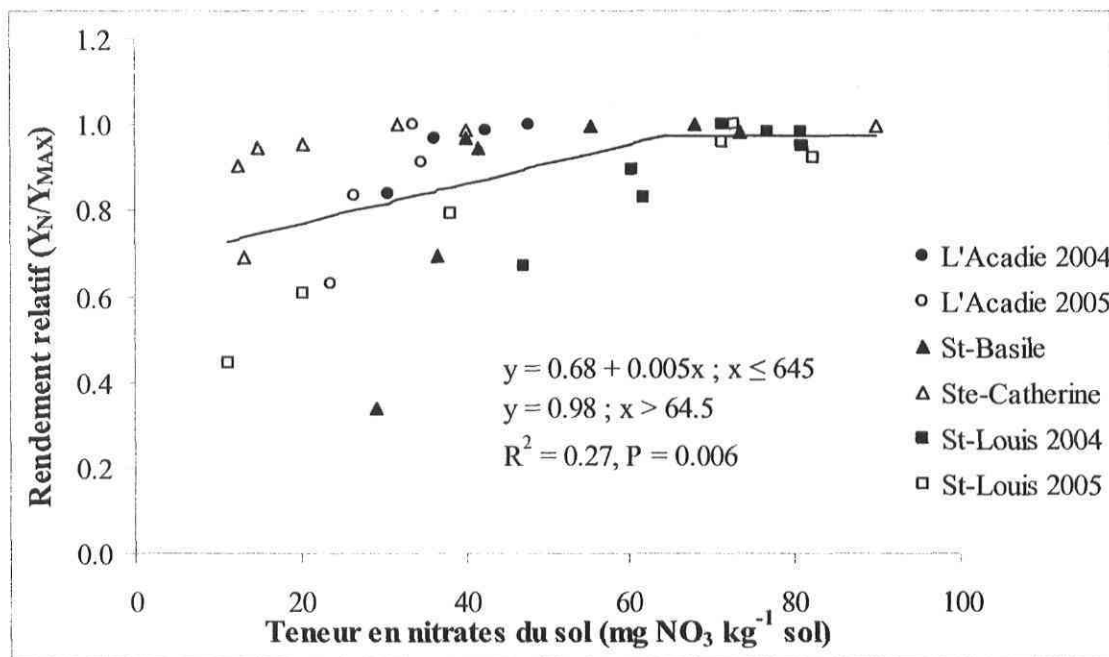


Figure 6.14. Relation entre la teneur en nitrates du sol moyenne et le rendement relatif; données provenant de tous les sites.

7. CONCLUSION

La fertilisation azotée a un impact important sur la production du maïs-grain et ce, à plusieurs niveaux. Elle permet bien sûr d'augmenter significativement le rendement. Toutefois, lorsque mal utilisée, elle contribue aussi de façon importante à la pollution environnementale, en plus d'avoir un impact économique pour les producteurs. La recherche de la juste dose d'azote est donc d'une grande importance pour tous. L'utilisation de différents outils diagnostiques, qui permettent d'évaluer le statut nutritif de la plante tout au long de la saison de croissance, devrait permettre d'améliorer la précision des apports de fertilisants en fonction des besoins de la plante. L'objectif de cette recherche était de valider la courbe de la teneur en N critique de Plénet et Lemaire (2000), afin de calculer des indices de nutrition azotée dans les conditions prévalant au Québec. Par la suite, nous voulions établir la relation entre ces INA et les valeurs du lecteur de chlorophylle SPAD-502 et les teneurs en nitrates du sol, afin de déterminer des valeurs critiques pour ces deux outils.

La réalisation de parcelles expérimentales sur différents sites en 2004 et 2005 et les mesures de biomasse et de teneur en azote des plantes ayant reçu différents traitements azotés ont permis de distinguer les situations limitantes et non limitantes en azote du maïs pour les conditions pédoclimatiques du Québec. À partir de ces données, il a été possible de valider la courbe de la teneur en N critique développée par Plénet et Lemaire (2000) en France.

Suite à cela, les teneurs en azote critique (N_c) basées sur la plante entière ont été calculées à l'aide de l'équation de la courbe : $N_c = 34W^{-0,37}$. Ces valeurs ont ensuite permis de calculer les indices de nutrition azotée. La régression entre l'INA et le rendement relatif a permis de démontrer une relation élevée ($R^2 = 0,88$) entre les deux paramètres et ce peu importe le site. Ceci confirme donc la première hypothèse et permet d'affirmer que l'INA est un indice fiable de la nutrition azotée des plantes.

L'INA a ensuite été mis en relation avec les mesures du lecteur de chlorophylle. La relation obtenue démontre une relation quadratique positive entre l'INA et l'indice de chlorophylle (IC) mais celle-ci est variable selon le site et l'année, ce qui rend impossible la détermination d'un IC critique unique. L'hypothèse 2 est donc confirmée partiellement puisqu'il existe une

relation entre les deux paramètres mais celle-ci n'est toutefois pas généralisable pour l'ensemble des sites et des années. Le SPAD-502 est donc un bon outil diagnostique pour informer sur la nutrition azotée du maïs, mais il doit toutefois être calibré sur chaque site et ce à chaque année, ce qui rend son utilisation beaucoup plus difficile. De la même façon, les données obtenues n'ont pas permis d'établir une relation unique entre l'IC et le rendement relatif, puisque celle-ci est plutôt spécifique à chaque site.

Finalement, aucune relation positive n'a été obtenue entre la teneur en nitrates du sol et l'INA, ce qui infirme la dernière hypothèse. L'étude a toutefois démontré que la teneur en nitrates du sol durant toute la saison reste plutôt stable à des valeurs inférieures à $50 \text{ mg NO}_3 \text{ kg}^{-1} \text{ sol}$ lorsque l'INA est inférieur à 0,81 et que les risques d'accumulation de NO_3 dans le sol, donc de pertes, augmentent lorsque les INA atteignent une valeur supérieure ou égale à 0,81. Les teneurs en nitrates du sol suivent la même relation en début de saison, c'est-à-dire lorsque la plante est au stade V8 à V10. Toutefois, la valeur de l'INA à partir de laquelle les risques d'accumulation de NO_3 augmentent passe de 0,81 à 0,97. De plus, les données disponibles n'ont pas permis d'obtenir une relation unique, valide pour tous les sites, entre la teneur en nitrates et le rendement relatif. En effet, les teneurs critiques en nitrates obtenues pour les différents sites variaient entre 22 et $70 \text{ mg NO}_3 \text{ kg}^{-1} \text{ sol}$.

En général, les retombées de ce projet portent essentiellement sur les connaissances générales de différents outils diagnostiques disponibles pour la fertilisation azotée et ce, dans les conditions présentes au Québec. Cette étude a donc permis de mettre en évidence l'efficacité de l'indice de nutrition azotée sous nos conditions et la possibilité de le mettre en relation avec d'autres indicateurs du statut azoté du maïs.

8. PERSPECTIVES

Afin d'améliorer l'utilisation de l'indice de nutrition azoté, du lecteur de chlorophylle et de la teneur en nitrates du sol comme outils diagnostiques, il est important de continuer la recherche. Ainsi, afin de faciliter l'analyse des résultats et de développer avec plus de certitude des outils diagnostiques fiables, les modifications suivantes sont proposées pour des recherches futures.

Tout d'abord, l'absence de différences significatives entre les traitements azotés pour la biomasse aérienne des plantes en début de saison a grandement diminué la quantité de points expérimentaux disponibles pour la validation du modèle à des biomasses faibles (1 à 2 t MS ha⁻¹). Afin d'éviter ce type de problème, il serait pertinent d'avoir des doses différentes dès le semis des plantes, ce qui permettrait une meilleure expression des différences entre les traitements et ce, non seulement pour la validation du modèle, mais aussi pour l'utilisation de l'indice de chlorophylle et la teneur en nitrates du sol. De plus, afin d'avoir plus de points expérimentaux pour la validation ou encore dans le but de développer une courbe propre au Québec, il serait intéressant de reprendre cette étude avec plus de répétitions et plus de sites. Il pourrait aussi être intéressant de vérifier si le modèle de Plénet et Lemaire (2000) est réellement bien adapté aux différents cultivars utilisés au Québec, soit ceux de saison plus courte (2100 UTM) par rapport à ceux de plus longue saison (2900 UTM) qui sont sans doute plus près des cultivars utilisés en France et en Allemagne. En effet, peut-être qu'en traitant les deux types de cultivars indépendamment il serait possible d'obtenir deux modèles typiques.

D'autre part, afin de mieux comprendre les différences existant au niveau de l'indice de chlorophylle, il serait pertinent de bien identifier la ou les causes de ces différences en faisant des essais pour chacun des facteurs possibles. Soit le site lui-même (différentes textures de sol, température, précipitations), l'année, le cultivar utilisé ou encore un mélange entre tous ces facteurs. La compréhension de ce qui cause ces différences permettra d'améliorer et de développer de manière plus fiable cet outil diagnostique. En effet, sa facilité d'utilisation, ainsi que son faible coût, le rend très avantageux pour les producteurs agricoles.

Une autre amélioration serait de faire les échantillonnages à des stades de croissance précis de la plante (4-6 feuilles, V8, V10, V12, etc.) plutôt qu'une fois à chaque semaine, ceci afin d'obtenir des indices de chlorophylle et des teneurs en nitrates critiques pour un stade en particulier et ce, de façon plus précise. Le stade V8 serait l'idéal puisqu'il correspond généralement au stade de la deuxième application d'azote.

D'un autre côté, il serait intéressant de vérifier si l'utilisation d'une parcelle de saturation pour calculer un indice de saturation en chlorophylle serait une avenue plus intéressante que l'utilisation des valeurs absolues d'indice de chlorophylle et ce, peu importe le site. En effet, les données obtenues ne sont pas suffisantes pour tirer une conclusion claire à ce sujet. Toutefois, il semble que l'indice de saturation soit plus efficace que la valeur absolue dans les sols à textures plus lourdes (loams, argiles), et moins dans les sols sableux. Il serait donc intéressant de faire une étude en ce sens. Il serait aussi intéressant de vérifier l'efficacité d'une parcelle témoin, plutôt que d'une parcelle de saturation, pour calculer un indice de chlorophylle relatif.

BIBLIOGRAPHIE

- Aitchison, J. 1986. Statistical analysis of compositional data. Chapman and Hall, New York.
- Bedekovick, P. 1987. L'excès de nitrates dans les eaux : problèmes et perspectives techniques. Perspectives Agricoles 115: 184-189.
- Bélanger, G., J.E. Richards, P.E. Milburn et D. Walker. 1998. Influence of previous cropping practices on the response of spring wheat to applied N on Podzolic soils. Can. J. Soil Sci. 78: 267-273.
- Bélanger, G., J.R. Walsh, J.E. Richards, P.H. Milburn et N. Ziadi. 2001a. Predicting nitrogen fertilizer requirements of potatoes in Atlantic Canada with soil nitrate determinations. Can. J. Soil Sci. 81: 535-544.
- Bélanger, G., J.R. Walsh, J.E. Richards, P.H. Milburn et N. Ziadi. 2001b. Critical nitrogen curve and nitrogen nutrition index for potato in Eastern Canada. Amer. J. Potato Res. 78: 355-364.
- Bélanger, G. et F. Gastal. 2000. Nitrogen utilization by forage grasses. Can. J. Plant. Sci. 80: 11-20.
- Bélec, C., N. Tremblay, H. Perrault, L. Belzile et P. Fournier. 2006. Le lecteur de chlorophylle pour la juste dose d'azote dans le maïs-grain. Clubs conseils en agroenvironnement. Longueuil, Québec.
- Blackmer, A.M., D. Pottker, M.E. Cerrato et J. Webb. 1989. Correlations between soil nitrate concentrations in late spring and corn yields in Iowa. J. Prod. Agric. 2:103-109.
- Brunelle, A. 1994. Du maïs fertilisé selon les nitrates du sol. Bulletin des agriculteurs. Avril 1994. pp. 23, 24.
- Bullock, D.G. et D.S. Anderson. 1998. Evaluation of the Minolta SPAD-502 chlorophyll meter for nitrogen management in corn. J. Plant Nutr. 21(4): 741-755.
- Costa, C., L.M. Dwyer, P. Dutilleul, D.W. Stewart, B.L. Ma et D.L. Smith. 2001. Interrelationships of applied nitrogen, SPAD, and yield of leafy and non-leafy maize genotypes. J. Plant Nutr. 24(8): 1173-1194.
- CPVQ, 1988; mise à jour en 1993. Méthode d'analyse des sols, des fumiers et des tissus végétaux. AGDEX 5333: 1-2.
- CRAAQ, 2003. Guide de référence en fertilisation. 1^{ère} éd. Centre de Référence en Agriculture et Agroalimentaire du Québec. Ste-Foy, Québec. 294 pages.

- Cui, R.-X., M.-O. Kim, J.-H. Kim, H.-S. Nam et B.-W. Lee. 2002. Determination of critical nitrogen concentration and dilution curve for rice growth. *Korean J. Crop Sci.* 47 (2): 127-131.
- Diker, K., M. Unlu et W.C. Bausch. 1999. Determining spatial variability of plant nitrogen in corn field using a chlorophyll meter. Sheffield, UK: Sheffield Academic Press. 593-602.
- Dionex corporation. 1987. Determination of nitrite, nitrate and ammonia in KCl soil extracts. Sunnyvale, CA.
- Doucet, R. 2002. La science agricole, Fertilisation et environnement. Éditions Berger. 175 pages.
- Dwyer, L.M., A.M. Anderson, B.L. Ma, D.W. Stewart, M. Tollenaar et E. Gregorich. 1994. Quantifying the nonlinearity in chlorophyll meter response to corn leaf nitrogen concentration. *Can. J. Plant Sci.* 75: 179-182.
- Environnement Canada, 2001. La science du changement climatique. Volet 1 : Introduction/ GES/ forçage radiatif. Disponible à : http://www.msc-smc.ec.gc.ca/saib/climate/climatechange/cc_presentation_f.PDF (Consultée le 12 novembre 2005)
- Farruggia, A., F. Gastal et D. Scholefield. 2004. Assessment of the nitrogen status of grassland. *Grass Forage Sci.* 59: 113-120.
- Fontes, P.C.R. et C.P. Ronchi. 2002. Critical values of nitrogen indices in tomato plants grown in soil and nutrient solution determined by different statistical procedures. *Pesq. Agropec. Bras.*, Brasilia, v.37, n.10: 1421-1429.
- Fox, R.H., J.M. Kern et W. Piekielek. 1986. Nitrogen fertilizer source, and method and time of application effects on no-till corn yields and nitrogen uptakes. *Agron. J.* 78: 741-746
- Gamboa, A. 1978. La fertilisation du maïs. Bulletin IIP n°5. Publié par : Institut international de la potasse. Berne, Suisse. 72 pages.
- Gastal, F. et G. Lemaire. 2001. N uptake and distribution in crops : an agronomical and ecophysiological perspective. *J. Exp. Bot.* 370: 789-799.
- Genstat 5 Committee. 1993. Genstat 5 Release 3 Reference Manual. Oxford: Clarendon Press.
- Giroux, M. et T.S. Tran. 1995. Effet des doses et des modes d'apport des engrais azotés sur le rendement et la qualité du maïs-ensilage et sur les reliquats des nitrates dans les sols. *Agrosol* 8: 3-11.
- Greenwood, D.J., G. Lemaire, G. Gosse, P. Cruz, A. Draycott et J.J. Neeteson. 1990. Decline in percentage N of C3 and C4 crops with increasing plant mass. *Ann. Bot.* 66: 425-436.

- Groupe de travail sur la classification des sols. 2002. Le système de classification des sols. 3^{ième} édition. Direction générale de la recherche, Ministère de l'agriculture et Agro-Alimentaire du Canada. Publication 1646. 196 pages.
- Halvorson, A.D., F.C. Schweissing, M.E. Bartolo, and C.A. Reule. 2005. Corn response to nitrogen fertilization in a soil with high residual nitrogen. *Agron. J.* 97: 1222-1229.
- Hendershot, W.H., H. Lalonde, et M. Duquette. 1993. Ion exchange and exchangeable cations. p. 167-176. Dans M.R. Carter, ed. *Soil sampling and methods of analysis*. Can. Soc. Soil Sci. Lewis Publishers, Boca Raton, FL.
- Herrmann, A. et F. Taube. 2004. The range of the critical nitrogen dilution curve for maize (*Zea mays* L.) can be extended until silage maturity. *Agron. J.* 96: 1131-1138.
- Isaac, R.A. et W.C. Johnson. 1976. Determination of total nitrogen in plant tissue, using a block digester. *Journal of the AOAC*. 59 (1): 98-100.
- Isfan, D. 1995. Économisez en appliquant la bonne dose d'azote. *Bulletin des agriculteurs*. Mars 1995. pp.62, 63.
- Isfan, D, J. Zizka, A. D'Avignon et M. Deschênes. 1995. Relationships between nitrogen rate, plant nitrogen concentration, yield and residual soil nitrate-nitrogen in silage corn. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 26 (15-16): 2531-2557.
- Justes, E., B. Mary, J.-M. Meynard, J.-M. Machet et L. Thelier-Huches. 1994. Determination of a critical nitrogen dilution curve for winter wheat crops. *Ann. Bot.* 74: 397-407.
- Justes, E., M.H. Jeuffroy et B. Mary. 1997. Chapitre 4: Wheat, barley, and durum wheat pages 73-91 dans G. Lemaire, ed. *Diagnosis of the nitrogen status in crops*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Kachanoski, R.G. et E. Beauchamp. 1991. Soil nitrogen test for corn in Ontario. Department of Land Resource Science Report, University of Guelph, Guelph, ON.
- Kowalenko, C.G. 2004. Section two: Nutrient Management pages 33-34 dans S. Bittman et C.G. Kowalenko, ed. *Advanced silage corn management*. Pacific field corn association, Agassiz, BC.
- Lachat Instruments. 2005. Methods list for automated ion analyzers (flow injection analyses, ion chromatography). Disponible à : <http://www.lachatinstruments.com/applications/MethodsList.PDF> (consulté le 26 juin 2006)
- Lemaire, G. et J. Salette. 1984. Relation entre dynamique de croissance et dynamique de prélèvement d'azote pour un peuplement de graminées fourragères. I. Étude de l'effet du milieu. *Agronomie* 4: 423-430.

- Lemaire, G. et M. Chartier. 1992. Relationships between growth dynamics and nitrogen uptake for individual sorghum plants growing at different plant densities. Dans: Proceedings of the 2nd ESA Congress. Warwick University, England, 23-29 August 1992. pages 98-99.
- Lemaire, G., D. Plénet et D. Grindlay. 1997. Leaf N content as an indicator of crop N nutrition status. Dans : Diagnosis of the nitrogen status in crops. G. Lemaire (Ed.) Springer-Verlag Berlin Heidelberg. pp. 188-199.
- Lemaire, G., E. van Oosterom, J. Sheehy, M.-H. Jeuffroy, A. Massignam et L. Rossato. 2006. Is crop N demand more closely related to dry matter accumulation or leaf area expansion during vegetative growth? *Field Crops Research*. 100 : 91-106.
- Liang, B.C. et A.F. MacKenzie. 1994. Corn yield, nitrogen uptake and nitrogen use efficiency as influenced by nitrogen fertilization. *Can. J. Soil Sci.* 74: 235-240.
- Ma, B.L., K.D. Subedi et C. Costa. 2005. Comparison of crop-based indicators with soil nitrate test for corn nitrogen requirement. *Agron. J.* 97:462-471.
- Magdoff, F.R., D. Ross et J. Amadon. 1984. A soil test for nitrogen availability to corn. *Soil Sci. Am. J.* 48: 1301-1304.
- Magdoff, F.R., W.E. Jokela, R.H. Fox, et G.F. Griffin. 1990. A soil test for nitrogen availability in the northeastern United States. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 21 (13-16): 1103-1115.
- Maynard, D.G., Y.P. Kalra. 1993. Nitrate and exchangeable ammonium nitrogen. p. 25-38. Dans M.R. Carter, ed. *Soil sampling and methods of analysis*. Can. Soc. Soil Sci. Lewis Publishers, Boca Raton, FL.
- McRae, T., C.A.S. Smith et L.J. Gregorich. 2000. L'agriculture écologiquement durable au Canada: Rapport sur le Projet des indicateurs agroenvironnementaux. Agriculture et Agroalimentaire Canada, Ottawa (Ont.). 226 pages.
- Microsoft. 2001. Microsoft Excel 2001. Incline Village, NV.
- Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires Rurales de l'Ontario (MAAARO). Édition 2002. Disponible à : <http://www.omafra.gov.on.ca/french/crops/pub811/3devel.htm> (consulté le 27 novembre 2006).
- Ministère du Développement Durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP). Édition 2000. Disponible à : <http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/sys-image/global/global3.htm> (consulté le 16 novembre 2005).

- Morot-Gaudry, J.-F. 1997. Sources et cycle de l'azote. Dans : Assimilation de l'azote chez les plantes, aspects physiologique, biochimique et moléculaire. J.-F. Morot-Gaudry (Ed.). INRA éditions. Paris, France. pp. 21-25.
- Onken, A. B., R. L. Matheson, et D. M. Nesmith. 1985. Fertilizer nitrogen and residual nitrate-nitrogen effects on irrigated corn yield. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49:134-139.
- Parent, L.E. et M. Dafir. 1992. A theoretical concept of compositional nutrient diagnosis. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 117 (2): 239-242.
- Peng, S., F.V. Garcia, R.C. Laza et K.G. Cassman. 1993. Adjustment for specific leaf weight improves chlorophyll meter's estimate of rice leaf nitrogen concentration. *Agron. J.* 85: 987-990.
- Piekielek, W.P., R.H. Fox, J.D. Toth et K.E. Macneal. 1995. Use of a chlorophyll meter at the early dent stage of corn to evaluate nitrogen sufficiency. *Agron. J.* 87: 403-408.
- Piekielek, W.P. et R.H. Fox. 1992. Use of a chlorophyll meter to predict sidedress nitrogen requirements for maize. *Agron. J.* 84: 59-65.
- Plénet, D et G. Lemaire. 2000. Relationships between dynamics of nitrogen uptake and dry matter accumulation in maize crops. Determination of critical N concentration. *Plant Soil.* 216: 65-82.
- Rashid, M.T., P. Voroney et G. Parkin. 2004. Predicting nitrogen fertilizer requirements for corn by chlorophyll meter under different N availability conditions. *Can. J. Soil Sci.* 85: 149-159.
- Raun, W.R., and G.V. Johnson. 1999. Improving nitrogen use efficiency for cereal production. *Agron. J.* 91(3): 357-363.
- SAS Institute. 2001. The SAS system for Windows. Release version 6.12. SAS Institute, Cary N.C.
- Schepers, J.S., D.D. Francis, M. Vigil et F.E. Below. 1992. Comparison of corn leaf nitrogen concentration and chlorophyll meter readings. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 23 (17-20): 2173-2187.
- Schepers, J.S., T.M. Blackmer et D.D. Francis. 1992. Predicting N fertilizer needs for corn in humid regions: using chlorophyll meter. p. 105-114 dans B.R. Bock and K.R. Kelly, eds. Predicting N fertilizer needs for corn in humid regions. Bulletin Y-226. National Fertilizer and Environmental Research Center, Muscle Shoals, AL.
- Schroder, J.J., J.J. Neeteson, O. Oenema et P.C. Struik. 2000. Does the crop or the soil indicate how to save nitrogen in maize production? Reviewing the state of the art. *Field Crops Research* 66: 151-164.

- Shapiro, C.A. 1999. Using a chlorophyll meter to manage nitrogen applications to corn with high nitrate irrigation water. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 30 (7-8): 1037-1049.
- Sheldrick, B.H. et C. Wang. 1993. Particle size distribution. p. 499-512. Dans M.R. Carter (ed.) *Soil sampling and methods of analysis*. Lewis Publishers, Boca Raton, FL.
- Simard, R.R., N. Ziadi, M.C. Nolin and A. Cambouris. 2001. Prediction of N fertilizer needs for corn by N mineralization indicators. Dans *Optimizing Nitrogen Management in Food and Energy Production and Environmental Protection : Proceeding of the 2nd International Nitrogen Conference on Science and Policy*. TheScientificWorld 1(S2), 135-141.
- Smeal, D. et H. Zhang. 1994. Chlorophyll meter evaluation for nitrogen management in corn. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 25 (9-10): 1495-1503.
- Statistiques Canada. Agriculture recensement 2001. Disponible à : http://www.statcan.ca/francais/agcensus2001/first/farmop/02crops_f.htm (consultée le 16 novembre 2005)
- Stevenson, C.K. et C.S. Baldwin. 1969. Effect of time and method of nitrogen application and source of nitrogen on the yield and nitrogen content of corn (*Zea mays* L.). *Agron. J.* 61: 381-384.
- Tei, F., P. Benincasa et M. Guiducci. 2002. Critical nitrogen concentration in processing tomato. *Eur. J. Agron.* 18: 45-55.
- Tiessen, H., et J.O. Moir. 1993. Total and organic carbon. p. 187-199. Dans M.R. Carter (ed.) *Soil sampling and methods of analyses*. Can. Soc. Soil Sci. Lewis, Boca Raton, FL.
- Tran, T. Sen et Simard, R. R. 1993. Mehlich III-extractable elements. Pages 43-49. Dans M. R. Carter, ed. *Soil sampling and methods of analysis*. Canadian Society of Soil Science. Lewis Publishers, Boca Raton, FL.
- Tran, T.S. 1995. Efficacité et devenir de l'engrais azoté marqué (¹⁵N) appliqué sur la culture du maïs (*Zea mays* L.). Thèse de doctorat. Faculté des sciences de l'agriculture et de l'alimentation. Université Laval. 162 pages.
- Tran, T.S., D. Isfan, F. Chalifour, A. Mailloux et S.P. Guertin. 1996. Utilisation rationnelle de l'azote en agriculture. Pages 19-47 dans *Colloque sur la fertilisation intégrée des sols*. Conseil des productions végétales du Québec.
- Tran, T.S., M. Giroux et M.P. Cescas. 1997. Utilisation de l'engrais azoté marqué au ¹⁵N par le maïs selon les modes d'application et les doses d'azote. *Can. J. Soil Sci.* 77: 9-19.
- Tremblay, N., H.-C. Scharpf, U. Weier, H. Laurence et J. Owen. 2001. Régie de l'azote chez les cultures maraîchères - Guide pour une fertilisation raisonnée. Agriculture et Agroalimentaire Canada, St-Jean-sur-Richelieu. Disponible à :

http://res2.agr.ca/stjean/publication/bulletin/azote3-nitrogen3_f.htm (consulté le 8 juin 2006)

- Walworth, J.L. et M.E. Sumner. 1987. The diagnosis and recommendation integrated system (DRIS). *Adv. Soil Sci.* 117: 239-242.
- Waskom, R.M., D.G. Westfall, D.E. Spellman et P.N. Soltanpour. 1996. Monitoring nitrogen status of corn with a portable chlorophyll meter. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 27 (3-4): 545-560.
- Westerveld, S.M., A.W. McKeown, C.D. Scott-Dupree et M.R. McDonald. 2003. How well do critical nitrogen concentrations work for cabbage, carrot, and onion crops? *HortScience.* 38(6): 1122-1128.
- Zebarth, B.J. et J.W. Paul. 1997. 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., R.R. Simard, G. Allard et G. Parent. 2000. Yield response of grass forage to N fertilizer as related to spring soil nitrate sorbed on Anionic Exchange Membranes (AEMs). *Can. J. Soil Sci.* 80: 203-212.
- Zizka et Isfan. 1990. Effet des sources, des méthodes d'application et du fractionnement de l'azote chez le maïs fourrager. *Naturaliste can. (Rev. Écol. Syst.)*, 117 : 183-188.

