



L'Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA) a été constitué en mars 1998 par quatre fondateurs, soit le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation (MAPAQ), l'Union des producteurs agricoles (UPA), le ministère de l'Environnement et de la lutte contre les changements climatiques (MELCC) et le ministère de l'Économie, de l'Innovation (MEI).

L'Institut est une corporation de recherche à but non lucratif, qui travaille chaque année sur une centaine de projets de recherche en collaboration avec de nombreux partenaires du milieu agricole et du domaine de la recherche.

Notre mission

L'IRDA a pour mission de soutenir le développement d'une agriculture durable au Québec en favorisant le recours à l'innovation et aux partenariats.

Consulter le www.irda.qc.ca pour en connaître davantage sur l'Institut et ses activités.



Ce rapport peut être cité comme suit :

Gasser, M.-O., Occéan, N.R., Mathieu, J.B. et M., Wu. 2023. Réponse des cultures aux engrais comme indicateur de santé des sols. Rapport final présenté au ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation (MAPAQ). IRDA. 47 pages + annexes.

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

Équipe de réalisation du projet

Responsable scientifique

Marc-Olivier Gasser, agr., Ph. D., IRDA

Chargés de projet et prof. de recherche :

Nyck Rochel Occéan, agr. M. Sc.

Francis Allard, agr. M. Sc.

Marie-Ève Tremblay, agr., M. Sc.

Équipe de rédaction du rapport

Marc-Olivier Gasser, agr., Ph. D., IRDA

Nyck Rochel Occéan, agr., M.Sc.

Jean-Benoît Mathieu, M. Sc.

Myck Wu, Ph. D.

Collaborateurs IRDA

Eduardo Chavez Benalcazar, B. Sc.

Sébastien Rougerie-Durocher, M.Sc.

Pierre-Luc Lemire, Tech. A.

Clément Clarc Chedzer, Ph. D.

Les lecteurs qui souhaitent commenter ce rapport peuvent s'adresser à :

Marc-Olivier Gasser, agr., Ph. D., IRDA

Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA)

2700, rue Einstein, Québec (Québec) G1P 3W8

Téléphone : 418 643-2380, poste 650

Courriel : marc-o.gasser@irda.qc.ca

Remerciements

Ce projet de recherche a été réalisé grâce à une aide financière accordée par le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec. L'IRDA a également fourni une contribution importante dans le cadre de cette étude. Les auteurs remercient particulièrement les nombreux producteurs participants au projet ainsi que les clubs conseils suivants :

Agri Conseils Maska

AgriExpert

ChanvrExpert

Club Agroenvironnemental de l'Estrie

Club Agroenvironnemental de La Rive Nord

Club Conseil Agrivert

Club Conseil Agro-Champs

Fertior

Groupe conseil agricole de l'Abitibi

Groupe Pleineterre

JMP consultant

Novago Coopérative

Bélanger AgroConsultants

Yamasol

Les auteurs voudraient également remercier tous les membres du comité d'orientation et de suivi qui ont encadré la conception et la réalisation de ces travaux sous la gouverne du MAPAQ :

Comité d'orientation et de suivi du MAPAQ

Ayitre Akpakouma

Michel Champagne

Bruce Gélinas

Louis Robert

Janylène Savard

Gilles Tremblay

RÉSUMÉ

Les entreprises agricoles ont souvent tendance à sous-estimer l'importance de la santé des sols sur la productivité de leurs cultures, ce qui amène souvent à une fertilisation réalisée sans connaître l'effet de l'état de santé des sols sur les réels besoins en engrais des cultures. Le présent projet visait à évaluer combien les paramètres de santé des sols influencent la réponse des cultures aux engrais et si la réponse à ces engrais peut être utilisée comme indicateur de santé des sols.

Les essais ont été menés sur 107 sites préalablement caractérisés dans le cadre de l'Étude de l'état de santé de sols agricoles du Québec (EESSAQ) de 2020 à 2022. Les essais ont été menés sur 41 sites-années dans le maïs (maïs-grain et maïs-ensilage) et 66 sites-années dans des prairies de graminées. À chaque site, les essais ont été réalisés sur les quatre (4) points d'échantillonnage (PE) de l'EESSAQ pour autant de répétition. Dans le maïs, trois traitements ont été imposés sur chaque PE : sans engrais (M1), avec engrais azoté au démarrage (M2) et engrais azoté au démarrage et en post levée (M3). Pour les prairies, deux traitements ont été imposés : traitement sans engrais (P1) et traitement avec engrais azoté selon les recommandations du GREF après chaque coupe (P2).

En plus des propriétés de sols mesurées dans le cadre de l'EESSAQ en 2018 et 2019, la chimie-fertilité du sol a été mesurée au printemps dans les deux cultures. Des indicateurs de suffisance en N dans le sol (nitrate en post levée dans le maïs) et dans la plante (indice de nutrition azoté (INA) au stade V12 du maïs et à chaque coupe pour les prairies) ont également été relevés. Les rendements ont été mesurés à chaque coupe de foin et dans le maïs, en fin de saison en maïs-grain et maïs-ensilage.

Deux variables de réponses ont été retenues, le rendement sans engrais azoté et la différence de rendement obtenue avec l'apport d'engrais par rapport à celui du traitement sans engrais. Les unités thermiques maïs (UTM) et le bilan hydrique ont été utilisés comme variables explicatives, accompagnées des propriétés de sols de l'EESSAQ par horizon de sol, et remplacées dans le cas de l'horizon de surface (Ap1) par les propriétés de chimie-fertilité mesurée l'année même. L'analyse a été réalisée en corrélations canoniques par culture et par horizon de sol sur le logiciel R.

L'analyse en corrélations canoniques semblent davantage expliquer le rendement du témoin sans engrais que la différence de rendement obtenu par l'apport d'engrais, mais la variance expliquée demeure faible. Les variables climatiques expliquent moins de 1% de la variance du rendement sans engrais dans les prairies et environ 11 % dans le maïs. Les effets combinés du sol et du climat expliquent 42% de la variance pour le maïs et 23 % dans les prairies. Le rendement supplémentaire produit par l'apport d'engrais est encore moins relié aux indicateurs de santé des sols. Les effets des différents paramètres pédoclimatiques diffèrent toutefois selon les matériaux parentaux et les cultures. Dans les prairies, les paramètres pédoclimatiques affectent beaucoup plus les résultats dans les matériaux loameux, sableux à squelettiques et glaciaires, alors que dans les essais en maïs, les effets sont plus marqués dans les matériaux argileux.

La capacité du sol à dégager du CO₂ qui est habituellement synonyme de capacité du sol à minéraliser de l'azote est très significativement et négativement corrélée à la réponse aux engrais dans le cas des matériaux sableux à squelettiques, et dans une moindre mesure dans les matériaux glaciaires et argileux. Le dégagement de CO₂ et la stabilité des agrégats sont autant corrélés aux rendements sans engrais qu'à la réponse aux engrais, ce qui semble indiquer qu'une bonne qualité structurale avec une matière organique facilement décomposable sont des paramètres déterminant pour l'obtention d'un rendement de base sans apport d'engrais plus élevé et permettant de réduire la réponse des cultures aux engrais.

Outre ces effets, certains éléments disponibles dans le sol (P, Al, Fe, Mn, Zn) semblaient reliés soit au rendement sans engrais ou à la réponse aux engrais dans la corrélation canonique, mais ces effets variaient considérablement selon les différents matériaux parentaux et rendaient leur interprétation quelque fois incohérente.

Il a été plus évident d'établir des liens entre le rendement sans engrais et les variables pédoclimatiques dont celles reliées à la santé de sols que d'établir des liens avec la réponse aux engrais. Malgré la quantité considérable d'information générée et utilisée pour développer ces relations, le nombre d'observations (107 sites-années) n'était peut-être pas suffisant pour couvrir toutes les conditions pédoclimatiques de bases dans les deux cultures, permettant d'isoler les effets de la santé des sols. Il devient donc difficile d'utiliser cette information pour développer un indicateur de santé des sols basé sur la réponse des cultures aux engrais, du moins les relations obtenues seraient plus fortes pour prédire le rendement sans engrais et non la réponse aux engrais. Toutefois, la santé des sols demeure un enjeu important pour maintenir la productivité des cultures et obtenir un bon rendement. Il est donc toujours nécessaire d'encourager les producteurs à maintenir les bonnes pratiques de conservations de sols.

TABLE DES MATIÈRES

Résumé.....	4
1. Introduction.....	10
1.1 Contexte de l'étude	10
1.2 Objectifs de l'étude	10
2. Revue de littérature.....	12
2.1 La réponse des cultures aux engrais	12
2.2 Les facteurs influençant la réponse aux engrais	13
Le climat	13
Les propriétés du sol	14
Les pratiques culturales.....	14
3. Matériel et méthodes.....	16
3.1 Sélection des sites d'essais.....	16
3.2 Dispositif expérimental.....	17
3.2.1 Description des différents traitements	17
3.2.2 Mesure d'évitement de contamination	19
3.3 Échantillonnage et mesures de rendement	19
3.3.1 Mesures réalisées dans les parcelles en maïs	19
3.3.2 Mesures de rendement	20
3.4 Mesures réalisées dans les parcelles en prairies.....	21
3.4.1 Échantillonnage des sols au printemps (analyses courantes et N minéral)	21
3.4.2 Mesures de rendement et indice de nutrition azotée dans le feuillage	21
3.5 Analyses au laboratoire	21
3.5.1 Les analyses de sols	21
3.6 Détermination de l'indice de nutrition azoté	22
3.6.1 Culture de maïs.....	22
3.6.2 Prairies de graminées	22
3.7 Traitements statistiques.....	23
3.7.1 Variables analysées	23
3.7.2 Analyses statistiques	23
4. Résultats et discussion	25
4.1 Relation entre les doses d'engrais azotés apportées et le climat	25
4.2 Rendement des cultures.....	26

4.3 Relation entre les traitements témoins et les traitements fertilisés	27
4.4 Relations entre les indicateurs de santé des sols et les composantes du rendement.....	28
4.4.1 Essais dans le maïs.....	28
4.4.2 Essais en prairies de graminées.....	32
4.5 Liens entre l'indice de nutrition azoté (INA) et le nitrate au printemps sur la réponse de la culture aux engrais azotés.....	36
4.6 Relation entre le soufre dans la biomasse et le rendement	38
5. Conclusion	40
Références.....	42
Annexe A.....	45
Dose de N appliquée dans le maïs.....	45
Dose de N appliquée dans les prairies	46
Annexe B.....	47
Corrélations de Pearson entre variables de l'horizon Ap1, réponses aux engrais (différence de rendement) et rendements sans engrais.....	47
Corrélations de Pearson dans les essais en maïs	47
Corrélations de Pearson dans les essais en prairie	49

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Répartition des sites d'essais en maïs et en prairie et du nombre de points d'échantillonnage (PE) par année.....	16
Tableau 2 : Dose et moment d'application de l'engrais azoté dans le P2.....	19
Tableau 3: Variables explicatives utilisées dans les analyses.....	23
Tableau 4 : Corrélations canoniques dans le maïs.....	29
Tableau 5 : Corrélations de Pearson entre le rendement sans engrais dans le maïs et les variables de santé des sols ayant le plus d'influence sur les composantes canoniques, en fonction des différents matériaux.....	31
Tableau 6 : Corrélations de Pearson entre la réponse aux engrais dans le maïs et les variables de santé des sols ayant le plus d'influence sur les composantes canoniques, en fonction des différents matériaux...	31
Tableau 7 : Corrélations canoniques dans les différents horizons pour les prairies.....	33
Tableau 8 : Corrélations de Pearson entre le rendement sans engrais dans les prairies et les variables de santé des sols ayant le plus d'influence sur les composantes canoniques, en fonction des différents matériaux.....	34
Tableau 9 : Corrélations de Pearson entre la réponse aux engrais dans les prairies et les variables de santé des sols ayant le plus d'influence sur les composantes canoniques, en fonction des différents matériaux.....	35
Tableau 10 : Doses de N appliquées dans le traitement M3 en maïs.....	45
Tableau 11 : Doses de N appliquées dans le traitement P2 en prairies.....	46

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Hypothèses de relation entre la réponse des cultures et les conditions de sols.....	10
Figure 2: Courbe de réponse du blé aux apports d'engrais azotés (tiré de Angus,1995).....	12
Figure 3: Modèles structurels de base pour les modèles d'équations structurelles à plusieurs niveaux (tiré de Wade et al., 2020).....	13
Figure 4: Localisation des sites échantillonnés.....	17
Figure 5 : Exemple de dispositif expérimental en maïs.....	18
Figure 6: Dispositif expérimental des essais en prairies de graminées.....	18
Figure 7 : Stades végétatifs du maïs (adapté de Banks, 2019).	20
Figure 8: Relation les doses d'engrais azotés apportés et les variables climatiques.....	25
Figure 9: Rendement observé dans les prairies dans les différentes régions.....	26
Figure 10. Rendement moyen observé dans le maïs grain dans les différentes régions échantillonnées.....	27
Figure 11: Relation entre le T0 et le TN par matériau parental et par culture.....	27

Figure 12: Relation entre la teneur en nitrate au printemps et la réponse des cultures à la fertilisation azotée.	36
Figure 13: Relation entre l'INA et la réponse des cultures à la fertilisation azotée.	37
Figure 14: Relation entre la teneur en nitrates en post levée du maïs et la réponse du maïs à la fertilisation azotée.....	38
Figure 15: Relations entre le soufre dans le sol et le soufre dans la plante.	39
Figure 16: Relations entre le soufre dans la biomasse et le rendement.	39
Figure 17 : Influence des variables canoniques dans le maïs selon les matériaux parentaux dans l'Ap1 (1).	47
Figure 18 : Influence des variables canoniques dans le maïs selon les matériaux parentaux dans l'Ap1 (2).	48
Figure 19 : Influence des variables canoniques dans les prairies selon les matériaux parentaux dans l'Ap1 (1).	49
Figure 20 : Influence des variables canoniques dans les prairies selon les matériaux parentaux dans l'Ap1 (2).	50
Figure 21 : Influence des variables canoniques dans les prairies selon les matériaux parentaux (3).	51

1. INTRODUCTION

1.1 Contexte de l'étude

La productivité des cultures dépend du climat, de la nature intrinsèque des sols, de leur niveau d'amélioration foncière ainsi que de leur état de santé. Les entreprises agricoles ont souvent tendance à sous-estimer l'importance de la santé des sols sur la productivité de leurs cultures, ce qui amène souvent à une fertilisation réalisée sans connaître les réels besoins en engrais des cultures. En fait, le potentiel de rendement de la culture dans une région donnée est souvent utilisé pour déterminer les besoins en engrais, alors que le potentiel de productivité d'un champ donné est unique. On peut poser l'hypothèse que la réponse des cultures aux engrais azotés est influencée par la réserve en azote et de sa mise en disponibilité qui dépend de l'activité microbienne et de la condition physique du sol qui la régule.

L'Étude sur l'état de santé des sols agricoles du Québec (EESSAQ) réalisé par l'IRDA pour le compte du MAPAQ a permis de statuer sur les principaux problèmes de dégradation des sols rencontrés sur des séries de sols cultivées d'intérêt. Au cours de cette étude plusieurs sites ont été échantillonnés au Québec. Le potentiel de minéralisation en azote, de même que les quantités de C et N totales, ainsi que les paramètres liés aux propriétés physico-chimiques ont été mesurés à trois profondeurs à chaque point d'échantillonnage (4) sur chaque site. Cette caractérisation est apparue idéale pour évaluer comment la réponse des cultures à la fertilisation azotée est reliée à ces indicateurs. Il était aussi pertinent de vérifier si la réponse des cultures aux engrais pouvait servir d'indicateur pour détecter des problèmes de santé des sols (Figure 1) et pour sensibiliser les producteurs à évaluer l'état de santé ou la condition de leurs sols.

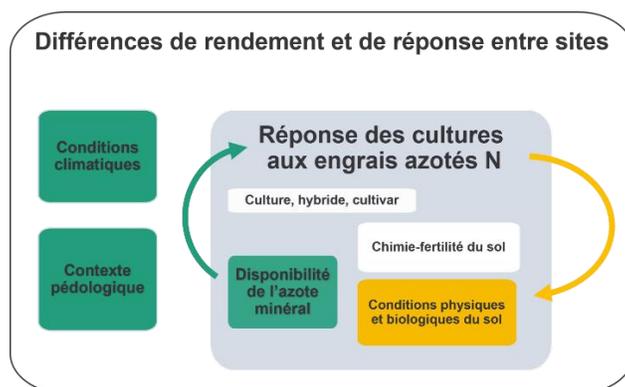


Figure 1: Hypothèses de relation entre la réponse des cultures et les conditions de sols.

Le projet consistait à évaluer comment la réponse de cultures nitrophiles comme celles du maïs (grain ou ensilage) ou des prairies de graminées à des apports d'engrais azotés est influencée par la condition et l'état de santé du sol caractérisés dans le cadre de l'EESSAQ.

1.2 Objectifs de l'étude

Le projet devait évaluer comment l'état de santé ou la condition physique du sol et son profil influence la réponse des cultures aux engrais azotés, lorsque les analyses courantes de sol n'indiquent aucun problème, en vue de

contribuer au développement d'un indicateur de santé des sols basé sur la réponse des cultures aux engrais. Il visait aussi à démontrer aux entreprises agricoles que:

- L'état de santé des sols, plus particulièrement la condition physique du profil cultural, peut affecter l'activité biologique dans le sol, la mise en disponibilité des nutriments, les besoins en engrais supplémentaires et finalement la réponse des cultures aux engrais;
- Le potentiel de productivité d'un champ est étroitement lié au sol, à sa condition physique et à la qualité du profil cultural;
- Une amélioration de la condition physique du profil cultural pourrait se traduire par une diminution des quantités d'engrais à appliquer et des économies en intrants.

2. REVUE DE LITTÉRATURE

2.1 La réponse des cultures aux engrais

Le potentiel de rendement d'une plante peut être défini comme la capacité totale de celle-ci à produire de la biomasse ou un rendement récolté lorsqu'il n'y a pas de contraintes environnementales (Richards, 1996). Pour établir la relation entre le rendement et l'apport de fertilisation azotée dans des conditions spécifiques, l'engrais azoté est appliqué à des doses croissantes (de zéro à des doses supérieures aux besoins). La biomasse produite ou le rendement sont alors déterminés en fonction de la quantité d'azote apportée. C'est la courbe de réponse de la culture aux apports d'engrais azotés (Figure 2).

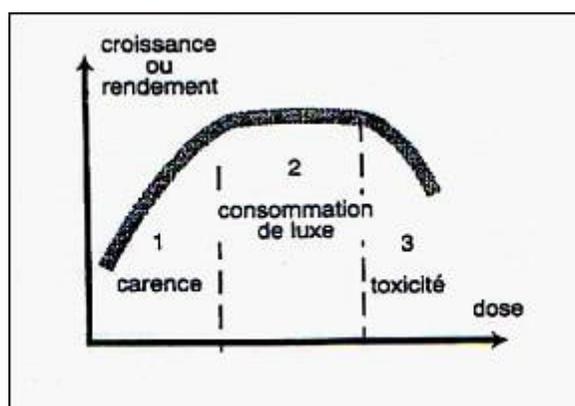


Figure 2: Courbe de réponse du blé aux apports d'engrais azotés (tiré de Angus,1995).

En général, la courbe de réponse illustre que dans des conditions de fortes déficiences en azote, le rendement est très faible et augmente linéairement avec l'apport d'engrais azoté. À l'approche du niveau d'apport optimal, la courbe tend vers une asymptote. La plante ne répond plus aux fertilisants apportés. Les apports de fertilisants supplémentaires peuvent être toxiques pour la plante et l'environnement et aussi affecter la rentabilité du producteur.

Le seuil de réponse des cultures à la fertilisation peut être conditionné par divers facteurs, notamment les propriétés du sol (Breland and Hansen, 1996; Scott et al., 1996) et le climat (Sogbedji et al., 2001; Kay et al., 2006). La réponse des cultures aux engrais peut varier entre divers champs (Scharf et al., 2002) ou en différents endroits dans un même champ (Blackmer and White, 1998). En 2020, Wade et al. (2020) ont présenté un modèle à deux niveaux pour illustrer comment la santé du sol et le climat peuvent affecter la réponse aux engrais entre divers sites et à l'intérieur d'un même site (Figure 3).

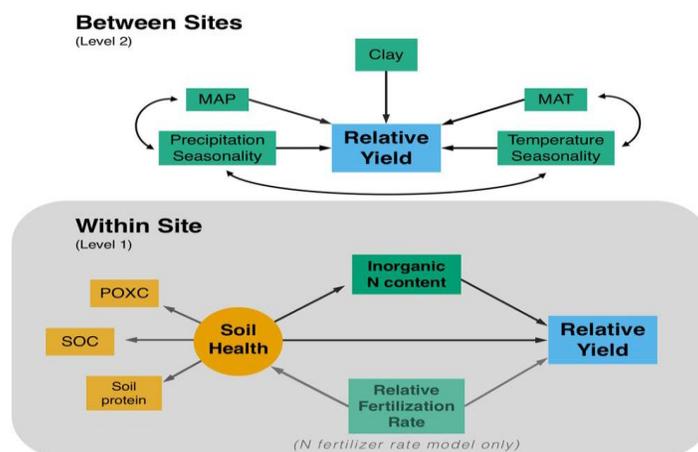


Figure 3: Modèles structurels de base pour les modèles d'équations structurelles à plusieurs niveaux (tiré de Wade et al., 2020)

MAP = précipitation annuelle moyenne ; MAT = température annuelle moyenne ;
POXC = Carbone oxydable au permanganate de potassium ; SOC = carbone organique du sol.

2.2 Les facteurs influençant la réponse aux engrais

En général, une relation prédominante est établie entre le rendement des cultures et l'apport de fertilisants minéraux. Cependant, dans certains essais de fertilisation du maïs, aucune relation n'a été décelée entre les doses d'azote apportées et les rendements (Kachanoski et al., 1996; Lory and Scharf, 2003). Cette absence de réponse peut être due à plusieurs facteurs comme le climat, les caractéristiques du sol et les pratiques culturales.

Le climat

Le climat peut influencer la réponse des cultures aux engrais par le fait qu'il a un effet sur la disponibilité des éléments nutritifs dans le sol. Kay et al. (2006) ont réalisé que le niveau d'azote disponible dans le sol était influencé par les précipitations en début de la saison de croissance. Dans une étude qui s'est déroulée sur une période de 33 ans au Québec, Almaraz et al. (2008) ont rapporté que les températures de juillet et les précipitations de mai sont hautement corrélées aux variations de rendements du maïs et expliquent plus de la moitié des variations de rendements liées au climat.

Selon Gilmour (1983) et Doel et al. (1990), le carbone du sol et le processus de minéralisation du carbone sont affectés différemment par les variations de température et d'humidité. Honeycutt et Potaro (1990), de leur côté, rapportent que l'unité thermique de maïs (UTM) exerce une influence sur la minéralisation de l'azote. En 2010, Wade a réalisé que le climat était le facteur le plus important dans la réponse du maïs à l'azote. Avec des résultats basés sur des moyennes climatiques, cette étude a démontré que la variabilité des précipitations entre les saisons augmente le rendement relatif des parcelles non fertilisées, tandis que la saisonnalité de la température diminue les rendements relatifs.

Les propriétés du sol

Les propriétés biologiques et physiques du sol vont augmenter ou réduire la fertilité du sol, ce qui va influencer la réaction des plantes face à la fertilisation apportée. La désignation de l'indicateur de sol le plus influent dans la détermination du rendement est sujet à grand débat et varie selon les différentes conditions couvertes par les études. Cambouris et al. (2016) ont réalisé que la texture de la surface du sol exerce une influence majeure sur la réponse du maïs à la fertilisation azotée. Dans leur étude, le maïs a été plus sensible aux différentes doses d'azote sur les sols argileux, et moins sensible dans les sols sableux podzolisés. Ils ont aussi démontré que d'autres propriétés du sol, comme le drainage, peuvent influencer la réponse du maïs à la fertilisation azotée. Ziadi et al. (2013) ont été obtenus de meilleurs rendements en maïs grain au Québec dans les loam sableux fin que dans les sols argileux et limoneux-argileux.

Nyiraneza et al. (2009) ont étudié les effets de 16 paramètres du sol sur le rendement du maïs et l'absorption de l'azote par une analyse en composantes principales. Les deux premières composantes expliquaient de 78 à 91 % la variabilité du rendement et l'absorption de l'azote. Les premiers indicateurs étaient le N total, le N dans l'acide humique, le N-NO₃ extrait au CaCl₂, le N-NO₃ extrait au KCl, le N-NO₃ cumulatif adsorbé sur des membranes d'échange d'anions et le N potentiellement minéralisable. Le N de l'acide fulvique et le N de la fraction non humifiée sont des indicateurs secondaires. Dans une publication de 2010 sur la réponse du maïs à la fertilisation azotée au Québec, Nyiraneza et al. ont démontré que la dose optimale économique était négativement corrélée au N soluble, au C soluble et aux nitrates en post levée (stade V6).

Les pratiques culturales

Les pratiques culturales, par leurs effets à court et long terme sur la santé des sols, exercent une influence certaine sur la réponse des cultures aux engrais. Or, les effets directs des pratiques ont parfois été difficiles à démontrer et à quantifier avec précision étant donné l'influence prépondérante des facteurs pédoclimatiques qui amène une grande variabilité au niveau des rendements. Des recherches ont tout de même démontré que l'amélioration des pratiques culturales, notamment la diversification de la rotation des cultures, permettent d'optimiser les rendements et sont parmi les facteurs influençant la réponse du maïs à l'azote (Franzluebbers et al., 1995; Sogbedji et al., 2001; Tremblay et al., 2012; Ziadi et al., 2013; Cambouris, 2016).

Un des aspects les mieux documentés à ce jour est l'effet des pratiques améliorant la qualité et la quantité de la matière organique du sol (M.O.) sur la réponse des cultures aux engrais azotés. Les sols ayant de plus fortes teneurs en M.O. ont généralement une meilleure santé biologique et physique (quoique ce ne soit pas toujours vrai), et ils ont par le fait même des teneurs en azote potentiellement minéralisable plus élevées, ce qui est favorable au bon développement des cultures (Franzluebbers et Stuedemann, 2015; Gasser et al., 2023). Certains auteurs ont rapporté qu'une bonne gestion des amendements en engrais organiques (AEO), reconnus justement pour contribuer à l'apport de M.O. au sol, ainsi que l'utilisation de plantes fixatrices d'azote comme engrais vert, améliorent l'efficacité d'utilisation de l'azote par les grandes cultures (Gastal et al., 2015). D'autres auteurs ont aussi rapporté une meilleure réponse suite à l'épandage d'AEO, mais en mentionnant que cet effet dépend du type d'AEO apporté, les sources solides tels que les fumiers étant plus efficaces pour améliorer l'efficacité d'utilisation de l'azote que les sources liquides, et que l'effet résiduel des engrais organiques appliqués les années précédentes est également un paramètre important (Maltas et al., 2013; Samson et al., 2019).

D'autres travaux ont démontré que la présence de résidus de cultures à la surface du sol a une influence positive sur la réponse des cultures aux engrais (Dalal et al., 2011). Des essais en parcelles expérimentales comparant des traitements différenciés par le travail du sol (semis-direct et travail conventionnel) et par la quantité de résidus laissés à la surface ont démontré qu'il n'y avait pas d'effet de travail du sol, mais un effet positif de la quantité de

résidus sur la réponse des cultures aux engrais. L'azote contenu dans ces résidus peut être immobilisé au départ, puis minéralisé progressivement sur une plus longue période, profitant aux cultures subséquentes. D'autres auteurs ont par contre noté une légère amélioration de l'efficacité de l'utilisation de l'azote par les cultures sous semis direct en comparaison au travail conventionnel, mais encore une fois, la présence ou non de résidus de culture avait un effet beaucoup plus significatif (Malhi et Nyborg, 1990). Fait intéressant à souligner, ces mêmes auteurs ont rapporté que dans les sols présentant une structure dégradée et une moins bonne rétention en eau, l'effet du travail sur la réponse est plus important, alors que dans les sols en bonne santé, c'est l'effet des résidus de cultures qui était prépondérant. Dans des essais de longue durée en Suisse, la réponse aux engrais était moins élevée dans les parcelles en travail conventionnel, et cela a été attribué au fait que l'azote était plus disponible dans les sols immédiatement après le labour, due à une minéralisation accrue de la matière organique (Malta et al., 2013). La plupart du temps, immédiatement après l'installation d'un régime de travail réduit ou de semis direct, il existe une période où l'azote est moins disponible, augmentant *de facto* la réponse aux engrais, mais cet effet s'estompe avec le temps jusqu'à ce qu'il y ait que très peu de différence de réponse entre les types de travail du sol.

Il est bien reconnu que de nombreux facteurs influencent la réponse des cultures aux engrais et plus particulièrement les besoins en engrais azotés. Les premiers mentionnés sont liés au climat qui influencent à la fois la productivité de la culture et la mise en disponibilité de l'azote dans le sol, ainsi que la nature intrinsèque du sol qui conditionne le type et la quantité de matière organique et sa capacité à minéraliser de l'azote. Viennent ensuite l'aménagement du terrain qui conditionnent le drainage et la disponibilité de l'eau, l'ajustement de la chimie-fertilité pour réduire les facteurs limitants la disponibilité des éléments nutritifs et finalement l'ensemble des pratiques agricoles qui conditionnent les retours en azote dans le système via les engrais organique et les précédents culturaux de légumineuses, ainsi que l'état de santé du sol ou plus particulièrement sa condition physique qui régule l'activité biologique et la capacité des microorganismes de recycler la matière organique et rendre l'azote disponible aux cultures.

Dans ce projet, l'hypothèse était posée qu'on peut démontrer que la réponse des cultures aux engrais est conditionnée par l'état de santé du sol et plus particulièrement sa condition physique à travers des essais réalisés chez les producteurs dans des sols préalablement caractérisés dans le cadre de l'EESAAQ. Le but étant de se servir de cette démonstration pour développer un indicateur basé sur la réponse des cultures aux engrais chez les producteurs pour les inciter à se questionner sur l'état de santé de leurs sols.

3. MATÉRIEL ET MÉTHODES

3.1 Sélection des sites d'essais

Les essais ont été réalisés en 2020, 2021 et 2022 sur des sites ayant été échantillonnés et caractérisés dans le cadre de l'Étude sur l'état de santé des sols agricoles du Québec (EESSAQ) en 2018 et 2019. Six sites supplémentaires ont été caractérisés et échantillonnés en 2022 selon le protocole de l'EESSAQ, pour augmenter le nombre à 407 sites caractérisés en sols minéraux. Les sites témoins non-cultivés (friches, haies brise-vent, bords de champ ou de clôture, etc.), les producteurs en régie biologique et ceux n'utilisant pas d'engrais minéraux ont été écartés dans le processus de sélection. Sur trois ans, on visait à établir chaque année 30 sites d'essais en maïs et 30 sites d'essais en prairies de graminées. Les sites étaient sélectionnés avec les critères suivants :

- La culture prévue par le producteur devait correspondre aux cultures à l'essai (maïs ou prairies de graminées);
- Le producteur était intéressé à collaborer avec l'équipe de terrain pour la mise en place des parcelles et prêt à respecter les consignes, c'est-à-dire de prendre soin de ne pas appliquer d'engrais sur les parcelles sans engrais;
- Aucun fumier et/ou lisier n'avait été appliqué sur le site à l'automne précédent l'essai;
- Le producteur avait l'équipement approprié pour réaliser les essais (e.g. semoir à maïs avec boîte d'engrais désembrayable).

Après réalisation des essais entre 2020 et 2022 et compilation des données valides, 107 sites-années ont été réalisés sur 67 sites distincts; certains sites ayant eu des essais plus d'une année (Figure 4 et Tableau 1). En général, il y avait quatre points d'échantillonnage (PE) par site. Ce principe a été respecté dans les essais en prairie, cependant, dans les essais en maïs, les données de certains PE ont été retirées pour cause de contamination par les épandages d'engrais. Le jeu de données comprend 421 points d'échantillonnage sur lesquels les données ont été validées durant les trois années d'essais.

Tableau 1 : Répartition des sites d'essais en maïs et en prairie et du nombre de points d'échantillonnage (PE) par année.

Année	Essais en maïs		Essais en prairie		Total	
	Sites	PE	Sites	PE	Sites	PE
2020	11	42	21	84	32	126
2021	13	51	25	100	38	151
2022	17	64	20	80	37	144
Total	41	157	66	264	107	421

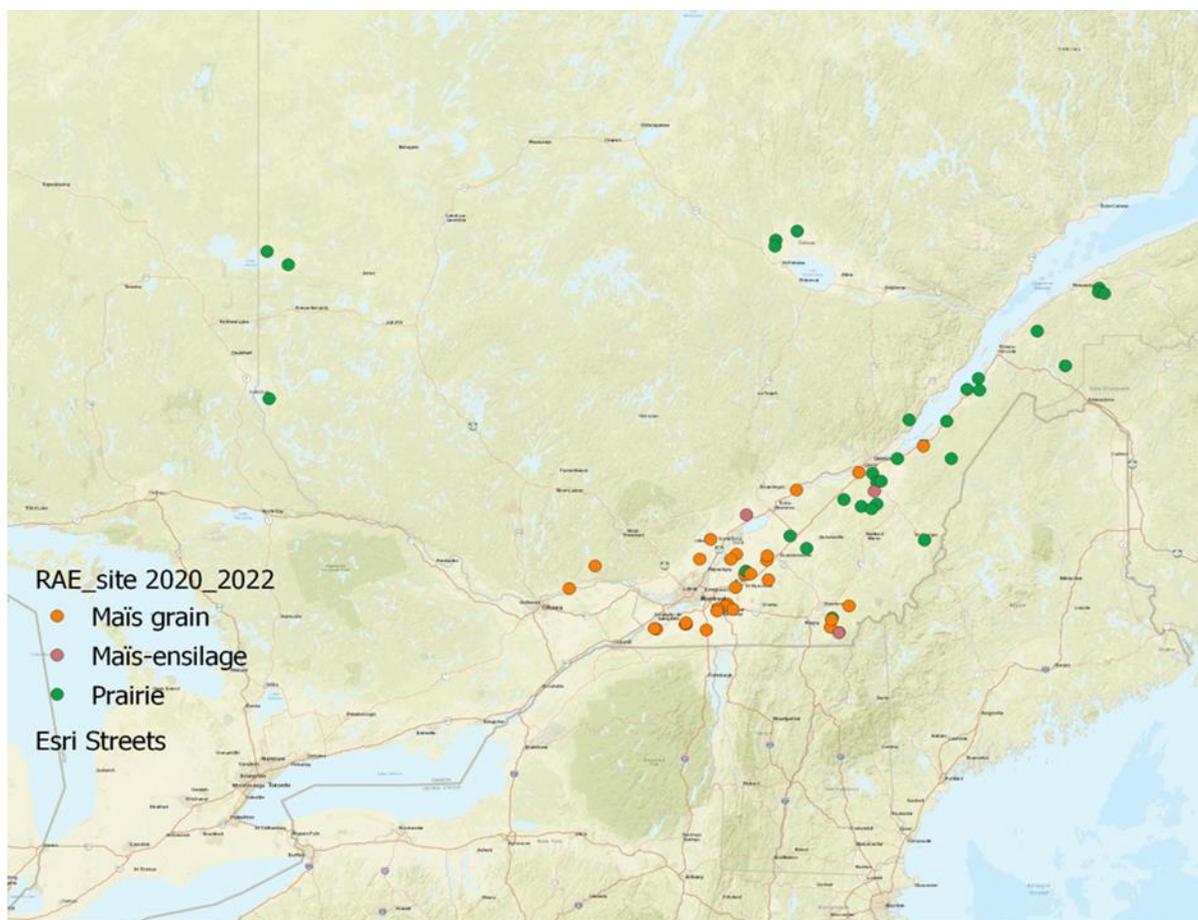


Figure 4: Localisation des sites échantillonnés.

3.2 Dispositif expérimental

3.2.1 Description des différents traitements

Parcelles en maïs-grain ou maïs-ensilage

Les blocs de parcelles ont été délimités autour des quatre PE de l'EESSAQ pour profiter de l'information recueillie sur les sols à ces endroits. Des parcelles d'environ 45 m² minimalement (4 rangs ou plus de maïs; 3,05 m de large x 15 m de long), ont été délimitées et placées aléatoirement de part et d'autre de ces PE pour accueillir les différents traitements de fertilisation. Quand des essais étaient répétés sur un site pour plus d'une année, les parcelles ont été déplacés l'année suivante pour éviter de conduire les essais au même endroit (Figure 5).

Trois niveaux de fertilisation en azote ont été comparés, soit :

- **M1** : Témoin sans engrais azoté;
- **M2** : Engrais de démarrage au semis seulement;
- **M3** : Engrais de démarrage + post levée : soit la dose appliquée par le producteur.

Les doses d'engrais azoté appliquées par les producteurs en M3 sont présentées à l'Annexe A.

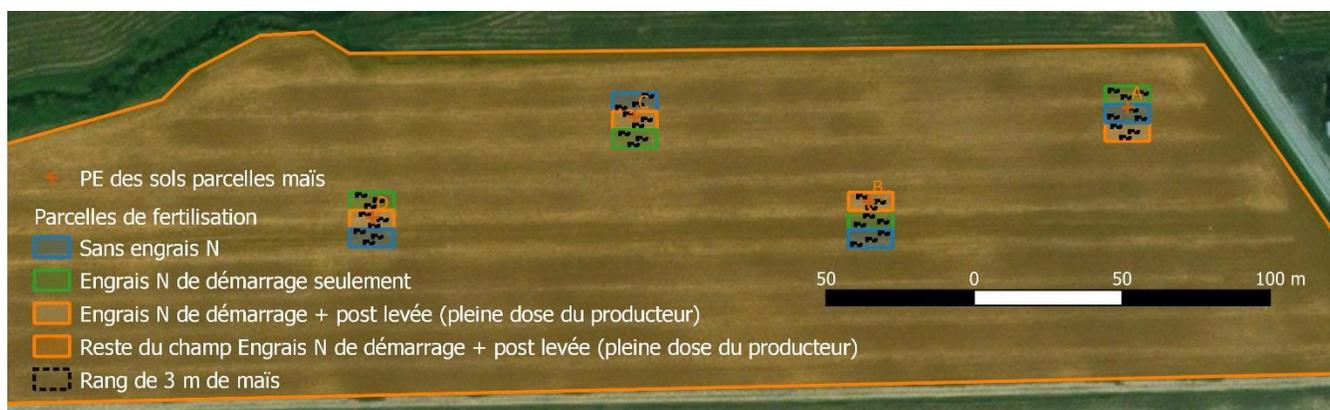


Figure 5 : Exemple de dispositif expérimental en maïs.

Parcelles en prairies de graminées

Dans les essais en prairie de graminées, le dispositif expérimental était constitué de blocs de parcelles d'environ 750 m² (15 m x 50 m) distribuées aléatoirement autour des quatre PE. Comme pour les parcelles en maïs, les parcelles ont été déplacées l'année suivante, si les essais étaient conduits sur plus d'une saison (Figure 6). Le nombre de traitements de fertilisation des prairies était limité à deux, soit :

- **P1** : Témoin sans engrais N;
- **P2** : Fertilisation azotée recommandée selon le GREF (CRAAQ, 2010) et le nombre de coupes.

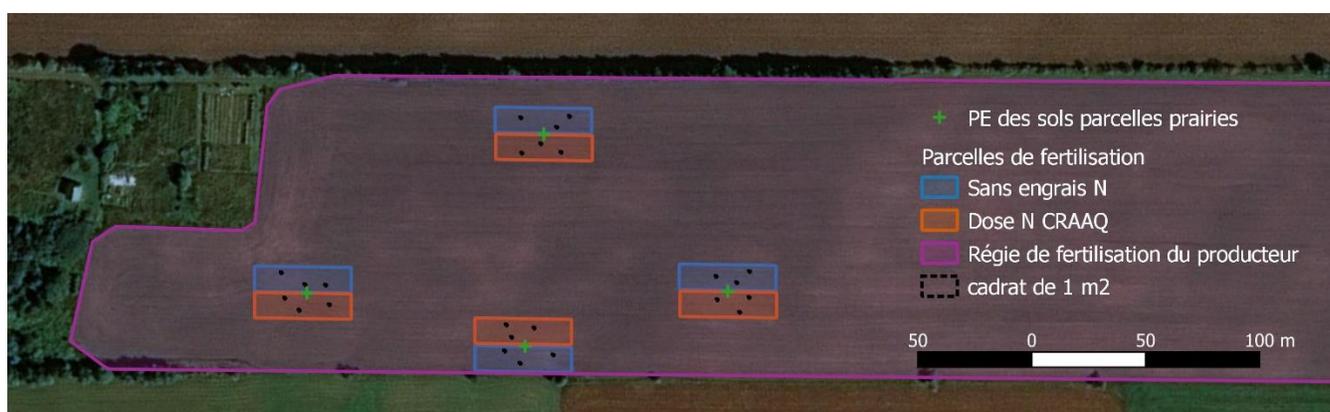


Figure 6: Dispositif expérimental des essais en prairies de graminées.

Les apports d'azote dans les prairies ont été fractionnés selon le nombre de coupes prévu par le producteur suivant les recommandations du Guide de référence en fertilisation du CRAAQ (Tableau 2).

Tableau 2 : Dose et moment d'application de l'engrais azoté dans le P2.

	Printemps	Après 1 ^e coupe	Après 2 ^e coupe
Régie 1 coupe	100 kg N/ha	-	-
Régie 2 coupes	100 kg N/ha	60 kg N/ha	-
Régie 3 coupes et +	100 kg N/ha	60 kg N/ha	40 kg N/ha

Les doses d'engrais azoté apportées sur chaque site sont présentées à l'Annexe A.

3.2.2 Mesure d'évitement de contamination

Pour éviter les contaminations lors des épandages, un sondage a été réalisé auprès des producteurs pour connaître leurs pratiques agricoles. Ainsi la plupart des parcelles ont été balisées dès l'automne précédent la saison d'essai pour éviter toute contamination lors des épandages de fumiers à l'automne.

Les parcelles ont été identifiées avec des drapeaux visibles. Une zone tampon a été délimitée autour des blocs de parcelles pour éviter que de l'engrais azoté soit appliqué par le producteur dans les parcelles d'essai, par un épandeur à la volée par exemple.

3.3 Échantillonnage et mesures de rendement

3.3.1 Mesures réalisées dans les parcelles en maïs

Échantillonnage des sols au printemps (analyses courantes et N minéral)

Au moment de la mise en place des parcelles au printemps, avant les semis ou tout épandage d'engrais, les sols ont été échantillonnés sur une profondeur de 0 à 17 cm à l'aide d'une sonde d'échantillonnage de 2 cm de diamètre. Un échantillon composite de huit prélèvements par bloc de parcelles a été collecté à chaque PE. L'échantillon composite a été conservé au frais et envoyé au laboratoire d'analyses agroenvironnementales (LAE) de l'IRDA.

Teneurs en nitrates dans le sol en post levée au stade V6

Lorsque les plants de maïs atteignaient le stade V6 (Figure 7), les sols des traitements M1 (sans engrais) et M2 (démarrage) ont été échantillonnés séparément. Des échantillons ont été prélevés de 0 à 30 cm de profondeur au centre de l'entre-rang de façon à éviter les bandes d'engrais. Un échantillon composite de six prélèvements a été collecté par traitement.

Les échantillons ont été conservés au réfrigérateur à basse température (4° C) et le plus rapidement au LAE de l'IRDA dans une glacière munie de blocs réfrigérants.

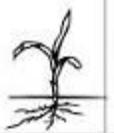
Stade	VE	V1	V4	V6	V8	V12	VT
							
Collerettes	0	1	4	6	8	12	(variable)
Pointe des feuilles	1	3	7	10	11	15	(variable)
Feuille recourbée	0	2	6	8	10	14	(variable)

Figure 7 : Stades végétatifs du maïs (adapté de Banks, 2019).

Indice de nutrition azotée dans le feuillage

Lorsque les plants de maïs atteignent le stade V12 (figure 4), dans chaque parcelle, tous les plants sur une longueur de 2 m sont récoltés, en coupant la tige à ras le sol. Cet échantillonnage est réalisé le plus tôt possible en avant-midi afin d'éviter une dérive de l'azote dans les plants (Lacroix et Abarza, 2002). Les plants sont comptés et pesés pour collecter le poids humide. Un sous-échantillon de 3 plants est ensuite pesé et envoyé à l'IRDA pour détermination du taux de matière sèche.

3.3.2 Mesures de rendement

Maïs-ensilage

Pour le maïs ensilage, les parcelles ont été récoltées à la main, quelques jours avant la date de récolte du producteur. Les échantillons ont été prélevés sur trois longueurs de 3 m linéaire de rang distribués aléatoirement dans la parcelle, en évitant les zones affectées par les travaux d'échantillonnage plus tôt en saison. La déviation du nombre de plants sur les trois longueurs d'échantillonnage n'excédait pas 2 plants pour avoir une certaine uniformité. Les tiges, coupés à 15 cm du sol, et les épis ont été récoltés et pesés séparément. Le poids humide des échantillons a d'abord été collecté, ensuite un sous échantillon a été envoyé au LAE de l'IRDA pour la détermination de la matière sèche.

Maïs-grain

Comme pour le maïs-ensilage, le maïs-grain a été récolté quelques jours avant le producteur, sur une longueur de linéaires de rang distribué aléatoirement dans la parcelle. Les mesures d'évitement des rangs affectés par les premiers échantillonnages et la règle sur la déviation du nombre de plants sur les trois longueurs de 3 mètres ont été similaires. Les épis de maïs ont été récoltés à la main et conservés dans des poches aérées et envoyés à la station de l'IRDA à St Bruno, où le rendement en grain a été obtenu en battant les épis récoltés à l'aide d'une égreneuse stationnaire. Le poids humide des grains battus a été mesuré. Les grains ont ensuite été séchés à 65°C jusqu'à poids constant afin de déterminer leur teneur en eau. Les teneurs en C, N et S total des échantillons de grain ont été plus tard dosées par combustion sur un appareil LECO.

3.4 Mesures réalisées dans les parcelles en prairies

3.4.1 Échantillonnage des sols au printemps (analyses courantes et N minéral)

Comme pour le maïs, des analyses de sols ont été réalisées pour les parcelles en prairies au moment de la mise en place des parcelles au printemps, avant tout épandage d'engrais. Les sols ont été échantillonnés selon les mêmes protocoles que les parcelles en maïs, sur une profondeur de 0 à 17 cm à l'aide d'une sonde d'échantillonnage de 2 cm de diamètre. Un échantillon composite de huit prélèvements par bloc de parcelles est collecté à chaque PE. L'échantillon composite a été conservé au frais et envoyé au LAE de l'IRDA.

3.4.2 Mesures de rendement et indice de nutrition azotée dans le feuillage

À chaque coupe de foin, un à deux jours avant la récolte prévue par le producteur, la composition botanique de la prairie a été déterminée et les équipes ont procédé à la collecte des échantillons de rendements. Les biomasses ont été prélevées dans trois quadrats de 1m² aléatoirement distribués dans chaque parcelle. La hauteur de coupe était de 3 cm au-dessus du sol. Chaque quadrat fauché est placé dans une bâche et pesé séparément à l'aide d'une balance et un trépied, et un sous-échantillon représentatif des trois quadrats a été envoyé à l'IRDA pour les analyses de laboratoire.

3.5 Analyses au laboratoire

3.5.1 Les analyses de sols

Analyse de sols au printemps

Au laboratoire de l'IRDA, les échantillons de sol reçus au printemps ont été séchés à l'air, puis broyés à 2 mm. Le pH à l'eau a été déterminé avec une électrode dans une solution de sol et d'eau dans un ratio 1:5 tandis que le pH tampon (SMP) a été déterminé dans un ratio de 1:10 après ajout de la solution tampon. Les teneurs en éléments P, K, Ca, Mg, Na, B, Al, Cu, Fe, Mn, Zn, Na et S ont été extraites à la solution Mehlich 3 dans un ratio sol: solution de 1:5 (Tran et al., 1990), puis dosées par spectrométrie d'émission au plasma d'argon (ICP) (Eaton et al., 2005; Greenberg et al., 1992).

Analyse de la teneur de nitrate en post-levée

La teneur en nitrate en post levée a été évaluée uniquement pour les essais en maïs sur les échantillons prélevés au stade V6 dans les traitements M1 et M2. Les teneurs en N minéral (N-NO₃ et N-NH₄) sont dosées par colorimétrie automatisée sur FIA (flow injection analysis, Lachat Instruments, Milwaukee, WI) dans des extraits de sol: solution de KCl 2M dans un ratio 1:10.

Analyse des végétaux

La teneur en eau des échantillons de matériel végétal (tiges, épis et grain de maïs, foin de graminées) a été déterminée par séchage à 65°C jusqu'à poids constant. L'analyse des éléments totaux C et N fût déterminée par combustion sur un appareil LECO. La teneur en S a été déterminée après digestion. Les biomasses de prairie ont également été analysées avec des méthodes rapides au proche infra-rouge (NIR), pour obtenir des estimés de

l'énergie nette de lactation (ENL), de la protéine brute (PB) et autres paramètres décrivant la valeur alimentaire et la qualité du fourrage de graminées.

3.6 Détermination de l'indice de nutrition azoté

3.6.1 Culture de maïs

L'indice de nutrition azoté pour le maïs (INA) est obtenu en appliquant l'équation suivante :

$$\text{INA} = [\text{N}] \text{ mesurée} / [\text{N}] \text{ critique}$$

Où [N] mesuré 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. Celui-ci est obtenu en appliquant l'équation tirée de Durand et al. (2018) :

$$[\text{N}] \text{ critique} = 34,0 \times \text{MS}^{-0,37}$$

Où 34 est à la concentration critique en azote exprimée en g par kg de MS (ou 3,4 %) pour une biomasse en matière sèche accumulée de 1 T/ha, et 0,37 est le coefficient de dilution. L'INA est optimal lorsqu'il avoisine les valeurs de 1,0, limitant si la valeur est inférieure à 1,0, et excédentaire si la valeur dépasse 1,0.

3.6.2 Prairies de graminées

L'INA est calculé sur le foin de la 1^{ère} coupe en appliquant l'équation suivante :

$$\text{INA} = [\text{N}] \text{ mesurée} / [\text{N}] \text{ critique}$$

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. Celui-ci est obtenu en appliquant l'équation tirée de Durand et al. (2018) :

Prairie de graminée de moins de 4 ans : $[\text{N}] \text{ critique} = 48,0 \times \text{MS}^{-0,32}$

Prairie de graminée de plus de 4 ans : $[\text{N}] \text{ critique} = 37,0 \times \text{MS}^{-0,35}$

Où 48,0 ou 37,0 sont les concentrations critiques en azote exprimées en g par kg de MS pour une biomasse en matière sèche accumulée de 1 T/ha et 0,32 ou 0,35 sont les coefficients de dilution. L'INA est optimale lorsqu'elle avoisine les valeurs de 1,0, limitante si la valeur est inférieure à 1,0 et excédentaire si la valeur dépasse 1,0.

3.7 Traitements statistiques

3.7.1 Variables analysées

Variables explicatives retenues

Pour analyser la réponse aux engrais, des variables mesurées dans les sols, des variables climatiques et des variables mesurées dans les plantes ont été sélectionnées. Pour les variables mesurées dans les sols, certaines ont été mesurées dans le cadre de l'EESSAQ et d'autres ont été mesurées au cours de la saison de croissance dans le cadre du présent projet. La liste des variables explicatives est présentée au Tableau 3.

Tableau 3: Variables explicatives utilisées dans les analyses.

Domaine	Variables	Horizons EESSAQ	Horizons RAE
Physique du sol	Argile, sable, MVA, teneur en eau au champ, capacité relative au champ, macroporosité	Ap1, Ap2, B	
	Agrégats 0,5 à 1 mm, Agrégats 0,25 à 0,5mm, DMP	Ap1	
	Conductivité hydraulique (cm/h)	Ap2, B	
Chimie-fertilité	pH, pH SMP, P, K, Ca, Mg, Na, Al, B, Cu, Fe, Mn, Zn	Ap1, Ap2, B	Ap (0-15 cm)
Biochimie de la M.O.	CO ₂ dégagé, N potentiellement minéralisable, N org., N potentiellement minéralisable/N org., C total, N total, C actif, C actif/C total	Ap1, Ap2, B	
	N-NH ₄ , N-NO ₃		Ap (0-15 cm)
	Nitrate post levée (stade V6 dans le maïs)		Ap (0-30 cm)
	Indice de nutrition azotée		Mesuré dans le feuillage
Climat	Bilan Hydrique, UTM.		

Deux variables climatiques ont été choisies pour interpréter la productivité des cultures en fonction du climat : les UTM, soit les unités thermiques maïs-grain, calculés selon la méthode de Bootsma, et le bilan hydrique, dont les unités sont en mm et qui est calculé en fonction de précipitations totales et l'évapotranspiration potentielle. Pour les saisons 2020 et 2021 les informations ont été collectées à l'année. Pour 2022 on a considéré une moyenne des quatre dernières années pour estimer les UTM et le bilan hydrique.

Variables de réponses

Deux variables de réponses ont été analysés : 1) T0 : le rendement des traitements sans azote et; 2) TN : la différence de rendement entre les traitements fertilisés et les traitements sans azote, qui correspond dans le cas des prairies à P2 - P1 et à M3 – M1 dans le cas du maïs. La différence de rendement est considérée comme la réponse à la fertilisation.

3.7.2 Analyses statistiques

Pour expliquer les deux variables de réponses, une analyse par corrélation canonique a été utilisée. L'analyse de corrélation canonique est une technique statistique multivariée utilisée pour établir la relation entre deux ensembles de variables. Elle permet d'établir les combinaisons linéaires de deux ensembles de variables qui sont le plus corrélées entre elles. L'analyse de corrélation canonique est pertinente dans les situations où il y a deux ensembles de variables qui sont supposés être liés, mais qui ne sont pas directement observés.

Le résultat de l'analyse de corrélation canonique constitue un ensemble de corrélations canoniques, qui représentent la corrélation maximale entre les deux ensembles de variables. L'analyse génère également des coefficients canoniques qui représentent les poids utilisés pour former les combinaisons linéaires des deux ensembles de variables linéaires. Les coefficients canoniques informent également sur la force et la direction de la relation entre les deux ensembles de variables.

Sur le logiciel R, la fonction `CCorA()` du package du même nom pour effectuer une analyse de corrélation canonique. La fonction **CCorA()** est basée sur la méthode de corrélation canonique adaptative (ACCa), qui a été développée pour améliorer la robustesse des analyses de corrélation canonique dans des situations où les variables ne sont pas normalement distribuées ou présentent des distributions fortement asymétriques.

Les éléments de chimie et fertilité mesurés au printemps ont été combinés aux horizons Ap1 et Ap2 de l'EESSAQ lors des traitements statistiques. Pour l'horizon B, la totalité des variables proviennent des analyses de l'ESSAQ. Nous avons donc des analyses par culture pour les horizons (Ap1+Ap, Ap2+Ap et B). Les effets du climat sur le rendement ont également été vérifiés pour chaque culture.

4. RÉSULTATS ET DISCUSSION

Avant de présenter les relations entre la réponse des cultures aux engrais et les indicateurs de santé des sols, quelques résultats sont présentés sur les relations obtenues entre les doses d'engrais apportées et le climat, ainsi que sur les rendements obtenus dans les deux cultures en fonction des régions et du climat pour tenir compte de ces facteurs dans l'analyse.

4.1 Relation entre les doses d'engrais azotés apportées et le climat

La Figure 8 rapporte les corrélations entre les unités thermiques maïs (UTM), le bilan hydrique (précipitations - ETP) et les doses d'engrais apportées par les producteurs dans le maïs et les prairies. Dans les prairies, les doses d'azote apportées (100, 160 et 200 kg N/ha) ont été établies selon le nombre de coupes que le producteur prévoyait réaliser, tandis que dans le maïs, les doses étaient établies par le producteur. On observe une corrélation positive entre les doses d'azote apportées dans le maïs ($r = 0,582$) et les UTM de la région et une corrélation négative avec le bilan hydrique ($r = -0,535$). Il y a toutefois une corrélation négative entre les UTM et le bilan hydrique dans les essais en maïs ($r = -0,662$) tout comme dans les essais en prairies ($r = -0,486$) qui est reliée aux conditions climatiques régionales. Le climat est plus chaud et plus sec en Montérégie, qu'il ne l'est en Chaudière-Appalaches et au Bas-Saint-Laurent où le climat est plus froid et humide. Les producteurs semblent prendre en compte le potentiel de rendement du maïs dans la région fort probablement reliée aux UTM pour ajuster la fertilisation azotée. Dans le cas des prairies, la dose d'engrais azoté a été ajustée en fonction du nombre de coupe prévue et elle est peu corrélée aux UTM et au bilan hydrique.



Figure 8: Relation les doses d'engrais azotés apportés et les variables climatiques.

4.2 Rendement des cultures

Les essais ont été réalisés dans la plupart des régions agricoles du Québec. La Figure 9 et la Figure 10 présentent les moyennes de rendement obtenues dans les différentes régions (plusieurs sites par région) selon les années.

Les rendements moyens observés dans les prairies, indique un rendement moyen nettement inférieur dans la région de la Capitale Nationale par rapport aux régions limitrophes, de Chaudière-Appalaches et Montmagny (Figure 9). Deux sites ont été échantillonnés dans la région de la Capitale Nationale en 2020 et un seul en 2021 et 2022. Au cours des trois années de l'étude, les producteurs se sont contentés d'une seule coupe, et le rendement de cette unique coupe était inférieur aux rendements de la première coupe des régions avoisinantes. Au Témiscamingue, un seul site a été échantillonné en 2022, et le rendement des trois coupes du traitement P1 étaient supérieur au rendement du traitement P2.

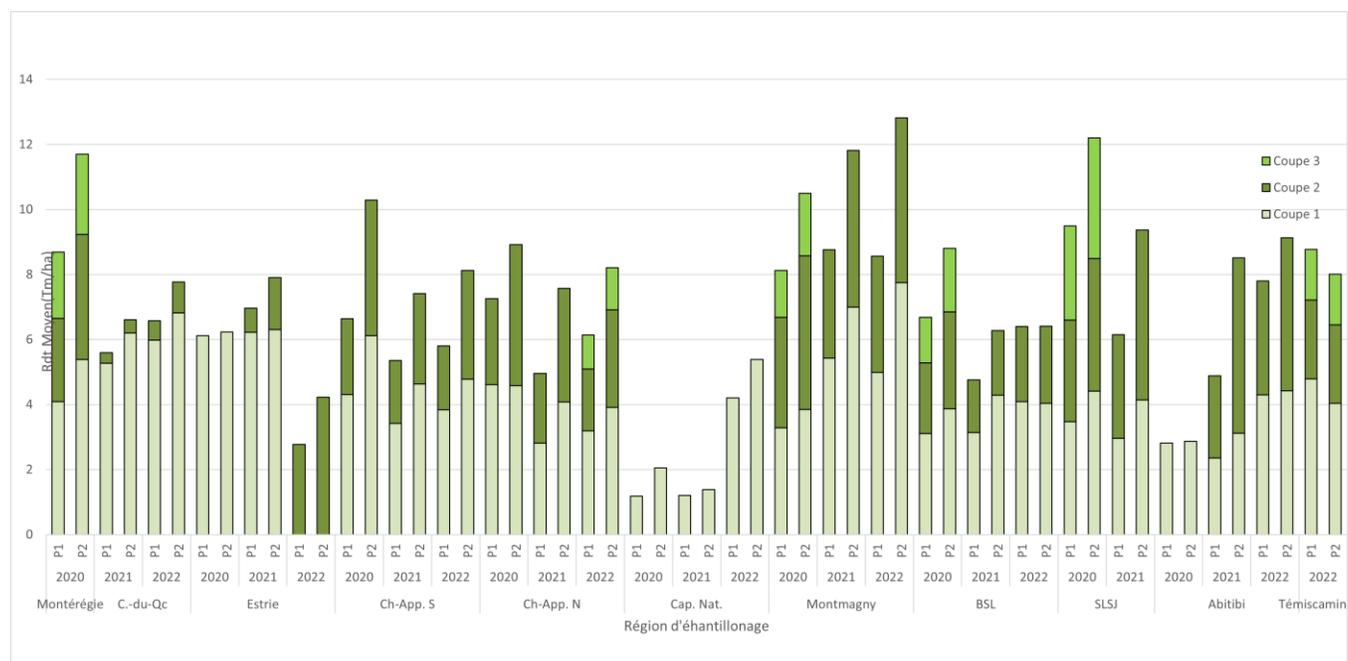


Figure 9: Rendement observé dans les prairies dans les différentes régions.

Dans le maïs, la moyenne de rendement est toujours supérieure dans le traitement M3 dans toutes les régions et pour les trois années de l'étude (Figure 10). Dans les régions les plus chaudes, comme la Montérégie, l'Estrie et la Mauricie/ Lanaudière, les rendements moyens obtenus dans le traitement M3 sont supérieurs au rendement régional rapporté pour ces régions par la Financière agricole du Québec (Centre du Québec : 9,21 t/ha; Montérégie : 10,72; Outaouais : 9,50; et Estrie : 10,96). Dans toutes les régions échantillonnées, les rendements moyens des sites témoins étaient inférieurs aux rendements régionaux.

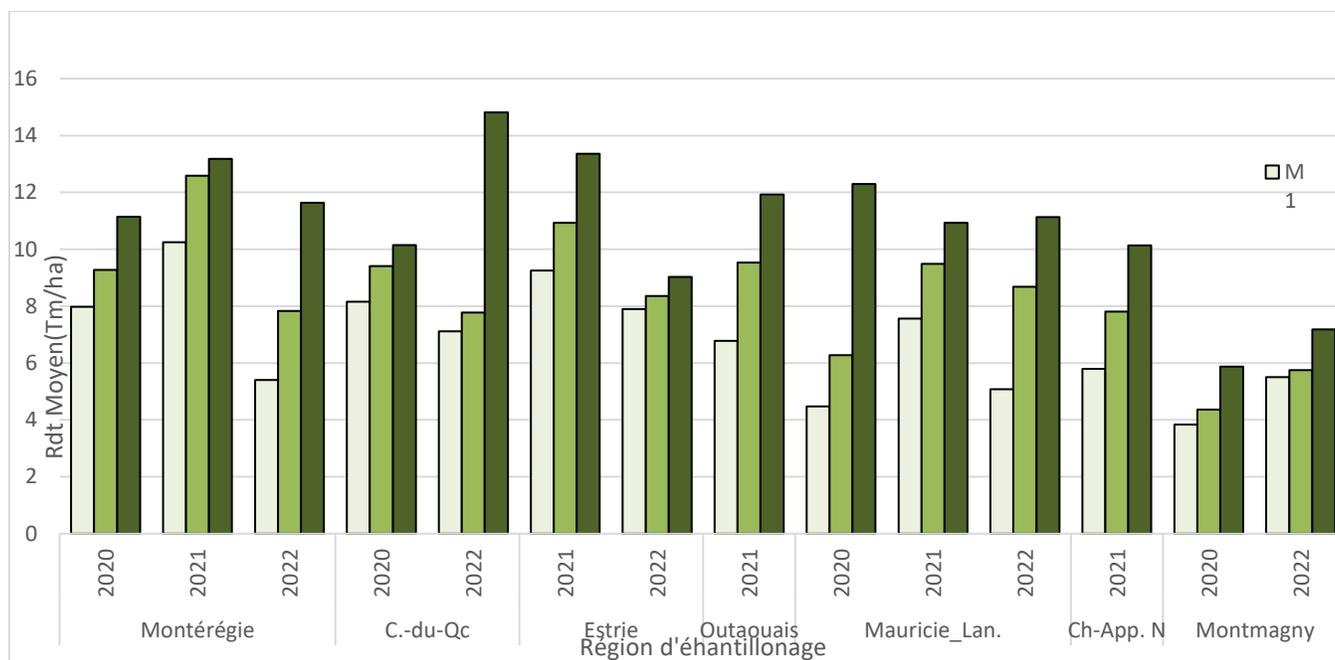


Figure 10. Rendement moyen observé dans le maïs grain dans les différentes régions échantillonnées.

4.3 Relation entre les traitements témoins et les traitements fertilisés

Une plus grande corrélation est observée entre le rendement témoin et le traitement fertilisé à pleine dose dans les sols sur matériaux parental sableux à squelettiques (Figure 11). Aux niveaux des cultures, la corrélation entre le rendement témoin et fertilisé semble plus forte pour les prairies que pour le maïs. La réponse aux engrais serait donc plus variable dans le maïs.

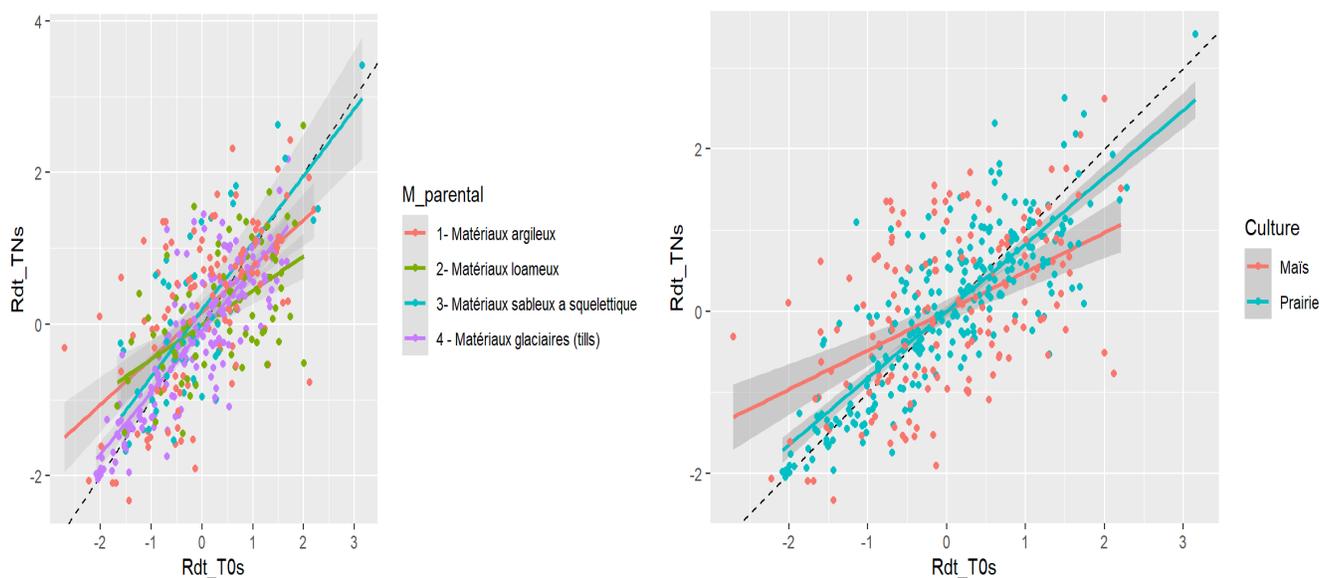


Figure 11: Relation entre le T0 et le TN par matériau parental et par culture.

4.4 Relations entre les indicateurs de santé des sols et les composantes du rendement

4.4.1 Essais dans le maïs

Ap1

Dans l'horizon Ap1, la première composante canonique a une forte corrélation positive ($r = 1,00$) avec le rendement témoin et une corrélation négative ($r = -0,46$) avec la réponse du maïs à l'apport supplémentaire en azote (Tableau 4). La deuxième composante canonique est surtout corrélée avec la réponse du maïs ($r = 0,89$). L'effet du climat seul explique peu la variance du rendement (R^2 ajusté de 0,11) (résultat d'une analyse indépendante) par rapport à l'effet combiné du sol et du climat dont le R^2 ajusté est de 0,42 (Tableau 4).

Les UTM ont toutefois une forte corrélation avec la première composante canonique (Tableau 4). Parmi les variables reliées à la condition physique du sol, la proportion d'agrégats inférieurs à 1 mm influencent positivement la première composante et négativement la deuxième composante. La respiration microbienne et la teneur en Zn ont une corrélation positive mais modérée avec la première composante. La deuxième composante est modérément influencée par le manganèse et le phosphore. La relation est positive avec P et négative avec Mn.

Ap2

Le modèle produit pour l'Ap2 est moins robuste, avec un R^2 ajusté de 0,29. La première composante canonique est fortement liée positivement au rendement témoin (0,98) et négativement corrélée à la réponse aux engrais (-0,32). La deuxième composante canonique est faiblement corrélée négativement au rendement témoin (-0,22) et fortement corrélée positivement à la réponse aux engrais (0,95). Les UTM présentent la plus forte corrélation avec la première composante, liée principalement au rendement sans engrais, suivie de la respiration microbienne. La deuxième composante est principalement influencée positivement par P et Fe et négativement par Mn.

B

Le modèle produit pour l'horizon B est aussi moins robuste que dans l'Ap1, avec un R^2 ajusté de 0,26. La première composante canonique est fortement corrélée et de façon positive avec le rendement témoin (0,90), sans relation apparente avec la réponse aux engrais. La deuxième composante canonique est fortement reliée expliquée à la réponse aux engrais (1,00) et négativement au rendement obtenu sans engrais (-0,44). Aucun paramètre de sol n'est lié à la première composante ($r > 0,20$). Pour la deuxième composante, le Mn y est encore une fois modérément corrélé avec une relation négative.

Tableau 4 : Corrélations canoniques dans le maïs.

		Ap1		Ap2		B	
		Variable 1	Variable 2	Variable 1	Variable 2	Variable 1	Variable 2
Variables de réponse	Rendement sans engrais	1,00	-0,06	0,98	-0,22	0,90	-0,44
	Réponse aux engrais	-0,46	0,89	-0,32	0,95	-0,08	1,00
Variables climatiques	UTM	0,31	0,26	0,34	0,20	0,38	0,12
	Bilan hydrique	0,05	-0,18	0,03	-0,18	-0,02	-0,19
Variables physiques du sol	Sable	0,09	0,04	0,09	0,01	0,02	0,02
	Argile	-0,02	0,01	-0,01	0,04	0,01	0,04
	MVA	-0,08	0,05	-0,12	0,06	0,05	0,10
	Macroporosité	0,01	0,07	0,04	0,04	-0,04	-0,12
	WFPS	-0,04	0,13	-0,07	0,11	-0,02	0,02
	DMP	-0,05	0,03				
	Agrégats 0,25 à 0,5 mm	0,22	-0,23				
	Agrégats 0,5 à 1 mm	0,25	-0,15				
	Conductivité hydraulique			-0,01	0,07	-0,17	-0,06
Variables de la biochimie, de la matière organique	C total	0,07	-0,01	0,09	0,02	-0,02	-0,09
	CO ₂ dégagé	0,21	-0,13	0,22	-0,09	0,09	-0,14
	C actif	0,12	0,05	0,12	0,07	0,01	-0,03
	C actif /C total	0,07	0,07	0,03	0,05	0,10	0,13
	N-NO ₃	0,19	-0,14				
	N-NH ₄	-0,03	0,01				
	Nminéralisable	0,14	-0,13	0,15	-0,09	0,08	-0,04
	Nminéralisable /N _{org}	0,16	-0,15	0,14	-0,11	0,07	-0,05
Variables de chimie et fertilité	pH	0,00	0,12	0,03	0,05	0,08	0,02
	pH SMP	0,06	0,12				
	P	0,10	0,20	0,14	0,21	0,06	0,07
	K	0,06	0,08	-0,06	0,20	-0,08	0,11
	Ca	0,00	0,04	0,02	0,06	0,04	0,04
	Mg	-0,05	0,12	-0,04	0,15	-0,02	0,10
	Na	0,01	0,01				
	S	0,08	-0,07				
	B	0,14	-0,02	0,09	-0,01	0,04	-0,05
	Al	-0,11	-0,02	-0,12	0,04	-0,10	-0,08
	Fe	0,04	0,12	0,15	0,21	0,10	0,13
	Cu	0,05	0,16	0,04	0,13	0,03	0,11
	Mn	0,15	-0,28	0,09	-0,28	0,01	-0,24
Zn	0,25	0,07	0,19	0,04	0,06	-0,03	
Corrélations canoniques (R _c)		0,78	0,67	0,71	0,56	0,68	0,57
R ² ajusté du modèle		0,42		0,29		0,26	

Corrélation négative forte [-1 – 0,3[Corrélation négative modérée]-0,3 – 0,2]	Corrélation faible]-0,2 – 0,2[Corrélation positive modérée]0,2 – 0,3]	Corrélation positive forte [0,3 – 1]
---------------------------------------	---	---------------------------------	--	--------------------------------------

Afin d'évaluer l'effet du matériau parental sur les variables de santé des sols ayant le plus d'influence dans les composantes canoniques, des matrices de corrélations de Pearson ont été calculées et sont présentées en Annexe B. Le sommaire des résultats est présenté plus bas dans le Tableau 5 et le Tableau 6.

Les corrélations entre la teneur en Mn et le rendement témoin sans engrais azoté sont peu significatives peu importe les matériaux (Tableau 5). Toutefois, la corrélation entre Mn et la réponse aux engrais est négative pour tous les matériaux, suivant la même logique que les résultats de l'analyse canonique des corrélations (Tableau 4), et elle est plus importante dans les matériaux argileux (Tableau 6). Les sols argileux déficitaires en Mn indiquent-ils des problèmes de santé des sols, si le maïs répond davantage aux apports engrais azotés? En fait, certains sols argileux de la plaine de Montréal, comme ceux de la série Providence sont reconnus pour avoir des teneurs plus élevées en Mn et une plus faible productivité comparativement aux argiles marines des séries Sainte-Rosalie et Saint-Urbain. Cependant, la plus faible réponse à l'azote dans ces sols avec une teneur en Mn plus élevée serait à élucider. Est-elle reliée à une toxicité du Mn ou une plus faible productivité liée à d'autres paramètres dans ces sols?

La teneur en Zn semble avoir un effet positif sur le rendement sans engrais azoté obtenu dans tous les matériaux sauf les loameux (Tableau 5), qu'on pourrait relier à des antécédents d'apport en engrais de ferme. La teneur en Zn est aussi positivement reliée à la réponse aux engrais dans les matériaux loameux, mais cette corrélation est négative dans les matériaux argileux (Tableau 6). Il est difficile d'expliquer les effets divergents du Zn sur la réponse du maïs aux engrais azotés en fonction de ces deux types de sols. L'effet du Zn pourrait être attribué aux apports en engrais de ferme des années précédentes, si ces tendances avaient été similaires dans le cas des teneurs en phosphore, mais l'effet est au contraire plutôt ambigu. L'analyse canonique des corrélations a effectivement relié positivement les teneurs en phosphore avec la réponse du maïs aux apports d'engrais, et ce dans l'horizon Ap1 et Ap2 (Tableau 4). Mais les corrélations de Pearson entre les teneurs en P et la réponse aux engrais azotés ou les rendements sans engrais sont plus ténues et plus difficilement explicables. Elles sont positives avec la réponse aux engrais azotés (mais non significatives) dans les matériaux sableux et argileux (Tableau 6), mais elles sont négatives (mais non significatives) avec les rendements sans engrais dans les matériaux sableux, et positives dans les matériaux argileux et glaciaires (Tableau 5). Les effets réels des teneurs en P sur les rendements sans engrais azotés et sur la réponse des cultures aux engrais sont donc discutables ou incohérents.

La capacité du sol à dégager du CO₂ est très significativement et négativement corrélée à la réponse aux engrais dans le cas des matériaux sableux à squelettiques, et dans une moindre mesure dans les matériaux glaciaires et argileux (Tableau 6). Ce dégagement de CO₂ serait synonyme de capacité de minéraliser de l'azote. Plus elle serait élevée, moins le sol répondrait à des apports supplémentaires en N et ce phénomène serait plus sensible dans les sols sableux. Le dégagement de CO₂ et la stabilité des agrégats sont autant corrélés aux rendements sans engrais qu'à la réponse aux engrais, ce qui semble indiquer qu'une bonne qualité structurale avec une matière organique facilement décomposable sont des paramètres déterminant pour obtenir un rendement de base plus élevé sans apport d'engrais (Tableau 5), et permettant de réduire la réponse des cultures aux engrais (Tableau 6). Finalement, la teneur en Fe comme variable influençant la réponse aux engrais dans la composante canonique 2 dans l'Ap2 n'est significative que dans les matériaux loameux, et à un seuil relativement faible (Tableau 6). Les effets du Fe sur le rendement sans engrais sont plus importants au niveau des matériaux sableux à squelettique (positifs) et les matériaux loameux (négatifs).

Tableau 5 : Corrélations de Pearson entre le rendement sans engrais dans le maïs et les variables de santé des sols ayant le plus d'influence sur les composantes canoniques, en fonction des différents matériaux.

Variables	Tous matériaux	Argileux	Loameux	Sableux à squelettiques	Glaciaires
Mn	0,16*	0,14	0,16	0,37	-0,35
P	0,09	0,29	-0,11	-0,26	0,33
Zn	0,25*	0,22	0,02	0,36	0,26
Fe	0,03	0,11	-0,28*	0,68*	-0,02
CO ₂ dégagé	0,21*	0,06	0,17	0,65*	0,05
Agrégats 0,25 à 0,5 mm	0,23*	0,19	0,14	0,24	0,14
Agrégats 0,5 à 1 mm	0,25*	0,18	0,29	0,43	0,08

Les valeurs suivies d'un * sont significatives à $P < 0,05$.

Tableau 6 : Corrélations de Pearson entre la réponse aux engrais dans le maïs et les variables de santé des sols ayant le plus d'influence sur les composantes canoniques, en fonction des différents matériaux.

Variables	Tous matériaux	Argileux	Loameux	Sableux à squelettiques	Glaciaires
Mn	-0,31*	-0,50*	-0,16	-0,38	-0,19
P	0,13	0,24	0,13	0,41	0,13
Zn	-0,06	-0,33*	0,39*	-0,05	-0,14
Fe	0,09	0,25	0,32*	-0,27	-0,11
CO ₂ dégagé	-0,21*	-0,28*	0,15	-0,68*	-0,47*
Agrégats 0,25 à 0,5 mm	-0,30*	-0,13	-0,27	-0,57*	-0,20
Agrégats 0,5 à 1 mm	-0,24*	-0,09	-0,24	-0,66*	-0,15

Les valeurs suivies d'un * sont significatives à $P < 0,05$.

Corrélation négative forte [-1 – 0,6[Corrélation négative modérée]-0,6 – 0,2]	Corrélation faible]-0,2 – 0,2[Corrélation positive modérée]0,2 – 0,6]	Corrélation positive forte [0,6 – 1]
--	--	--	---	---

4.4.2 Essais en prairies de graminées

Dans les prairies, l'effet du climat seul explique peu la variance du rendement (R^2 ajusté < 0,01) (résultat d'une analyse indépendante) par rapport à l'effet combiné du sol et du climat dont le R^2 ajusté est de 0,23 (Tableau 7). Dans tous les horizons, la première composante explique positivement le rendement sans engrais ($r > 0,90$), sans aucun lien avec la réponse aux engrais. La seconde composante est liée négativement et dans une moindre mesure au rendement sans engrais ($r < -0,42$) et est fortement corrélée et positivement à la réponse aux engrais ($r > 0,99$).

Dans l'horizon Ap1, les indicateurs de la condition physique du sol, soit la masse volumique apparente (MVA), le diamètre moyen pondéré des agrégats (DMP) et la capacité au champ relative (WFPS), ainsi que les teneurs en sable et argile, sont davantage reliés à la première composante corrélée au rendement sans engrais. La teneur en sable a un effet négatif et l'argile a un effet positif. Les argiles sont généralement reconnues pour avoir une capacité d'échange cationique (CEC) et une fertilité plus élevée. Les effets positifs de la MVA (et négatif de la macroporosité) sont inattendus; les rendements sans engrais devraient être plus faibles dans les sols plus compacts. La relation positive avec la capacité au champ relative (WFPS) pourrait exprimer un effet bénéfique de la capacité de rétention en eau du sol sur les rendements obtenus sans engrais dans les prairies.

Les nitrates au printemps influencent positivement la première composante alors que la respiration microbienne a un effet négatif. Plusieurs paramètres de la première composante, liés à la chimie-fertilité (pH SMP, P, K, Mg, B, Fe, Cu, Al), sont reliés à la première composante de l'horizon Ap1. Seul Al a un effet négatif. Du côté de la deuxième composante, liée à la réponse aux engrais, seule la teneur en $N-NH_4$ est corrélée de façon positive.

Dans l'horizon Ap2, la première composante corrélée au rendement sans engrais est expliquée par des paramètres physiques (argile, MVA, WFPS) et des paramètres de la composante chimie-fertilité (P, K, Ca, Mg, B, Al, Fe, Cu). Contrairement aux autres paramètres, Al a une relation négative avec cette composante. Dans la deuxième composante canonique davantage corrélée à la réponse aux engrais, seul Al est corrélé positivement comme variable de santé des sols, indiquant que la réponse aux engrais azotés serait plus importante dans les sols avec des teneurs plus élevées en Al, comme dans les sols sableux podzolisés par exemple.

Dans l'horizon B, la première composante canonique qui est fortement reliée au rendement sans engrais est influencée par les paramètres texturaux (positivement pour l'argile, négativement pour le sable) et aussi par la capacité au champ relative (WFPS). Beaucoup de paramètres de la composante chimie-fertilité, notamment le pH et les bases échangeables (Ca, Mg, K) ainsi que d'autres éléments (B, Fe, Cu, Mn) sont corrélés positivement à cette composante, alors que l'Al est corrélé négativement. Concernant la deuxième composante canonique qui est fortement corrélée à la réponse aux engrais, aucun indicateur climatique ou de santé des sols ne semble se démarquer, les corrélations étant très faibles. On peut en déduire que les caractéristiques des sols de l'horizon B n'influencent que très peu la réponse aux engrais dans les prairies, et qu'une analyse de cette ampleur avec autant de variabilité pédoclimatique ne permettra pas de distinguer clairement l'effet de ces variables dans l'horizon B.

Tableau 7 : Corrélations canoniques dans les différents horizons pour les prairies.

	Prairie	Ap1		Ap2		B	
		Variable 1	Variable 2	Variable 1	Variable 2	Variable 1	Variable 2
Variables Réponses	Rendement sans engrais	0,95	-0,30	0,91	-0,42	0,92	-0,40
	Réponse aux engrais	0,00	1,00	0,12	0,99	0,11	0,99
Variables climatiques	Bilan hydrique	-0,13	-0,01	-0,14	0,02	-0,14	-0,02
	UTM	0,16	0,03	0,06	0,02	0,16	0,01
Variables physiques du sol	Sable	-0,23	0,02	-0,19	0,03	-0,25	0,02
	Argile	0,32	0,08	0,32	0,06	0,34	0,05
	MVA	0,26	-0,07	0,24	-0,08	0,16	-0,15
	Macroporosité	-0,17	0,08	-0,02	0,07	-0,16	0,06
	WFPS	0,24	0,08	0,21	0,06	0,21	0,16
	DMP	0,26	-0,03				
	Agrégats 0.25 à 0,5 mm	-0,12	0,10				
	Agrégats 0,5 à 1 mm	-0,09	0,07				
	Conductivité hydraulique			0,01	0,02	-0,20	0,03
	Variables de la biochimie, de la matière organique	C total	-0,15	0,07	-0,06	0,02	-0,13
CO ₂ dégagé		-0,23	0,05	-0,04	-0,05	-0,09	0,13
C actif		-0,10	-0,04	-0,03	-0,13	-0,09	0,11
C actif /C total		0,11	-0,14	0,04	-0,18	0,08	-0,09
N-NO ₃		0,33	-0,03				
N-NH ₄		-0,12	0,21				
Nminéralisable		-0,06	0,08	0,03	0,00	0,02	0,11
Nminéralisable /N _{org}		0,03	-0,02	0,06	-0,08	0,13	0,04
Variables de chimie et fertilité	pH	0,10	-0,06	0,20	-0,09	0,27	-0,12
	pH SMP	0,31	-0,18				
	P	0,35	0,04	0,34	-0,04	0,14	0,08
	K	0,32	0,09	0,30	0,02	0,33	0,01
	Ca	0,18	0,02	0,23	-0,06	0,29	0,01
	Mg	0,27	-0,03	0,22	-0,09	0,32	-0,05
	Na	0,24	0,14				
	S	0,01	0,04				
	B	0,31	-0,10	0,33	-0,17	0,25	-0,06
	Al	-0,31	0,16	-0,28	0,20	-0,29	0,18
	Fe	0,20	-0,01	0,22	-0,04	0,22	0,07
	Cu	0,35	0,03	0,40	-0,06	0,45	-0,01
	Mn	0,17	-0,08	0,15	-0,11	0,21	-0,17
	Zn	0,05	0,10	0,08	-0,04	0,13	-0,01
Corrélations canoniques (R_c)		0,70	0,43	0,68	0,39	0,63	0,39
R^2 ajusté du modèle		0,23		0,19		0,18	

Corrélation négative forte [-1 – 0,3[Corrélation négative modérée]-0,3 – 0,2]	Corrélation faible]-0,2 – 0,2[Corrélation positive modérée]0,2 – 0,3]	Corrélation positive forte [0,3 – 1]
---------------------------------------	---	---------------------------------	--	--------------------------------------

Les effets des variables les plus influentes ont également été comparés selon les matériaux parentaux, comme dans les essais en maïs.

La capacité à dégager du CO₂ ou la respiration microbienne en incubation est négativement corrélée (une relation inverse à celle attendue) avec le rendement sans engrais, mais de façon plus importante dans les matériaux loameux (corr. = 0,53) et sableux à squelettiques (Corr=-0,32) (Tableau 8). Les teneurs en nitrates au printemps sont positivement corrélées avec les rendements obtenus sans engrais (relation attendue) et de façon plus marquée dans les matériaux glaciaires (corr. =0,44) et sableux à squelettiques (corr. =0,44). Cette relation est toutefois négative dans les sols loameux et la même tendance est observée pour le N-NH₄ et le MVA. Dans les matériaux glaciaires et loameux, les corrélations avec N-NH₄ sont respectivement de -0,2 et -0,6, et respectivement 0,2 et 0,7 pour la MVA. L'argile et le sable ont une influence plus marquée dans les matériaux sableux à squelettique (respectivement corr. = 0,6; corr. = -0,5). Le pH SMP a un plus grand impact dans les matériaux sableux à squelettique (corr. = 0,4) et les matériaux loameux (corr. = 0,4). La même tendance est observée pour la capacité au champ, le potassium et le cuivre. En effet, dans les matériaux loameux, les corrélations de ces trois paramètres avec le rendement témoin sont respectivement de -0,37, 0,4 et 0,5, et respectivement de 0,5, 0,6, et 0,7 dans les matériaux sableux à squelettique. Le magnésium a son effet plus marqué sur le rendement témoin dans les matériaux loameux (corr. = 0,7). L'aluminium et le phosphore ont leur influence dominant dans trois matériaux parentaux: matériaux loameux (corr. P=0,3; corr. Al=-0,7), matériaux glaciaires (corr. P = 0,4; corr. Al=-0,3) et matériaux sableux à squelettique (corr. P =0,6; corr. Al=-0,5).

Tableau 8 : Corrélations de Pearson entre le rendement sans engrais dans les prairies et les variables de santé des sols ayant le plus d'influence sur les composantes canoniques, en fonction des différents matériaux.

Variables	Tous matériaux	Argileux	Loameux	Sableux à squelettiques	Glaciaires
CO ₂ dégagé	-0,24	-0,21	-0,53*	-0,32	-0,17*
N-NO ₃	0,32*	0,06	-0,22	0,44*	0,44*
N-NH ₄	-0,17*	-0,06	-0,61*	0,01	-0,18*
pH SMP	0,35*	0,20	0,41*	0,42*	0,32*
Sable	-0,22*	0,21	0,24	-0,55*	-0,14
Argile	0,28*	-0,13	-0,17	0,57*	0,13
MVA	0,27*	0,08	0,72*	0,14	0,28*
DMP	0,25*	0,003	0,29	0,56*	0,18*
Capacité au champ	0,19*	-0,10	-0,37	0,45*	0,06
P	0,32*	0,12	0,35	0,63*	0,40*
K	0,27*	0,06	-0,39*	0,67*	0,15
Mg	0,25*	-0,19	0,68*	0,06	0,16
Cu	0,32*	0,19	0,50*	0,78*	0,16
Al	-0,34*	0,06	-0,72*	-0,47*	-0,34*

Les valeurs suivies d'un * sont significatives à P < 0,05.

Corrélation négative forte [-1 – 0,6[Corrélation négative modérée]-0,6 – 0,2]	Corrélation faible]-0,2 – 0,2[Corrélation positive modérée]0,2 – 0,6]	Corrélation positive forte [0,6 – 1]
---------------------------------------	---	---------------------------------	--	--------------------------------------

Concernant la réponse des cultures aux engrais (Tableau 9), plusieurs variables ont un effet plus prononcé dans les matériaux sableux à squelettique. C'est le cas pour les nitrates au printemps, l'argile, la capacité au champ et

le potassium (corr. = 0,5), le sable (corr. = -0,4), le cuivre, le DMP et l'aluminium (corr. = 0,3). La MVA et le magnésium ont leur influence plus prononcée dans les matériaux loameux (corr. MVA=-0,4 ; corr. Mg=-0,3). La respiration microbienne est plus influente dans les matériaux loameux (corr. = 0,3) et dans les matériaux glaciaires (corr. = 0,3). Le pH SMP a un plus grand impact dans les matériaux glaciaires (corr. = 0,4). Le phosphore impacte la réponse beaucoup plus dans les matériaux sableux à squelettiques (corr. = 0,3) et loameux (corr. = 0,2). Le N-NH₄, de son côté, est plus important dans les matériaux glaciaires (corr. = 0,3) et dans les matériaux sableux à squelettiques (corr. = 0,5).

Tableau 9 : Corrélations de Pearson entre la réponse aux engrais dans les prairies et les variables de santé des sols ayant le plus d'influence sur les composantes canoniques, en fonction des différents matériaux.

Variables	Tous les sols	Argileux	Loameux	Sableux à squelettiques	Glaciaires
CO ₂ dégagé	0,06	-0,01	0,33	-0,06	0,26*
N-NO ₃	-0,03	-0,16	0,03	0,53*	-0,16
N-NH ₄	0,20*	-0,11	0,30	0,48*	0,30*
pH SMP	-0,17*	-0,11	-0,10	0,17	-0,38*
Sable	0,02	0,10	0,23	-0,46*	0,06
Argile	0,08	-0,10	-0,20	0,50*	0,13
MVA	-0,09	-0,05	-0,41*	0,01	-0,11
DMP	0,02	-0,10	-0,16	0,27	-0,20
Capacité au champ	0,10	-0,13	0,08	0,46*	0,14
P	0,04	0,09	0,23	0,33	-0,11
K	0,09	-0,04	0,10	0,52	0,04
Mg	-0,01	-0,13	-0,27	0,22	-0,06
Cu	0,03	-0,23	0,18	0,29	0,06
Al	0,14*	0,14	0,22	-0,3*	-0,23*

Les valeurs suivies d'un * sont significatives à P < 0,05.

Corrélation négative forte [-1 – 0,6[Corrélation négative modérée]-0,6 – 0,2]	Corrélation faible]-0,2 – 0,2[Corrélation positive modérée]0,2 – 0,6]	Corrélation positive forte [0,6 – 1]
---------------------------------------	---	---------------------------------	--	--------------------------------------

4.5 Liens entre l'indice de nutrition azoté (INA) et le nitrate au printemps sur la réponse de la culture aux engrais azotés

Nous avons voulu vérifier et comparer comment la teneur en nitrate mesurée au printemps et l'indice de nutrition azoté (INA) étaient reliés à la réponse aux engrais dans les différents matériaux parentaux (Figure 12 et Figure 13). La relation attendue entre la réponse aux engrais et les teneurs en nitrate au printemps est généralement négative (Figure 12). Plus il y a de nitrate dans le sol, moins les cultures devraient répondre à des apports supplémentaires en N. Dans les matériaux argileux, la relation est négative pour les deux cultures, mais elle est plus marquée pour le maïs. Cette relation négative dans le maïs est aussi observée dans les tills et les matériaux sableux à squelettique, quoique dans une moindre mesure. Pour ce qui est des prairies, la réponse apparaît dans les sols issus de matériaux sableux à squelettique, ce qui n'est pas attendu et le même constat qu'au Tableau 9. On ne remarque aucune tendance pour les deux cultures dans les matériaux loameux.

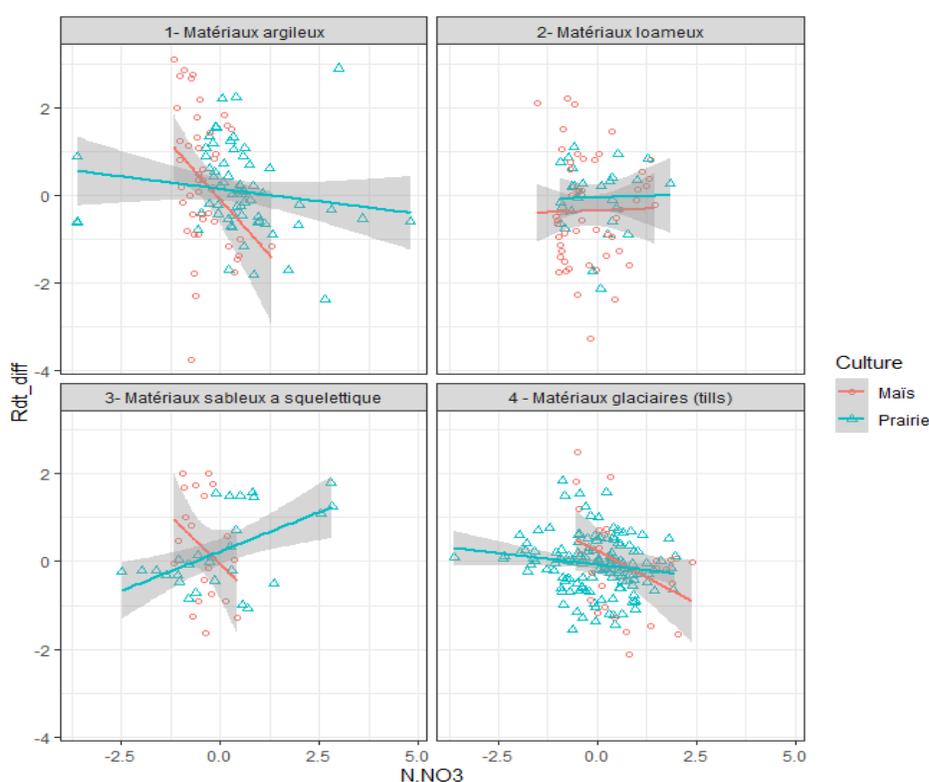


Figure 12: Relation entre la teneur en nitrate au printemps et la réponse des cultures à la fertilisation azotée.

On ne remarque pas plus de relation entre l'INA et la réponse aux engrais dans les matériaux loameux. La relation attendue entre l'INA et la réponse aux engrais est aussi négative. Plus l'INA est faible, plus la réponse devrait être élevée. Une relation négative semble assez prononcée pour le maïs dans les matériaux glaciaires et pour les prairies en sols argileux, mais dans les autres matériaux, la réponse des deux cultures aux apports d'engrais n'apparaît pas reliée.

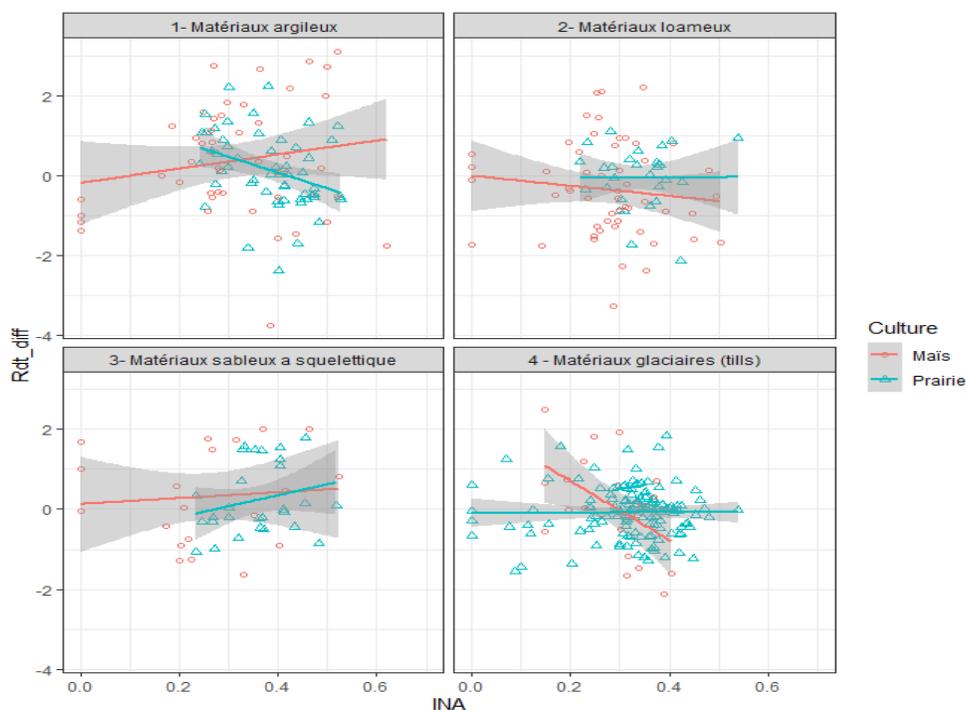


Figure 13: Relation entre l'INA et la réponse des cultures à la fertilisation azotée.

Le lien entre la teneur en nitrate en post levée au stade V6 du maïs et la réponse aux engrais a aussi été analysé (Figure 14). Aucune tendance ne se dégage dans les matériaux loameux, cependant une relation négative est observée dans les trois autres matériaux avec une pente plus prononcée dans les matériaux argileux et sableux à squelettique. Généralement, la littérature stipule qu'au-delà de 20 à 25 mg/kg (ou ppm) de N-NO₃ dans le sol en post levée du maïs, ce dernier ne devrait pas répondre à des apports supplémentaires en azote. Plusieurs observations ont des teneurs nettement plus élevées que ce seuil, soit plus de 50, ou même 100 mg/kg dans les matériaux loameux et glaciaires, mais la réponse des cultures aux engrais semble toujours présente. Il y aurait lieu de vérifier dans quelles conditions et pour quelles raisons ces sols répondent à des apports supplémentaires en azote et d'où originent ces quantités élevées de nitrate dans le sol. Des essais de fertilisation chez les producteurs en Chaudière-Appalaches ont aussi révélé des telles teneurs élevées de nitrate en post levées du maïs qui avait été reliées aux apports fréquents en engrais de ferme (Gasser et al., 2014).

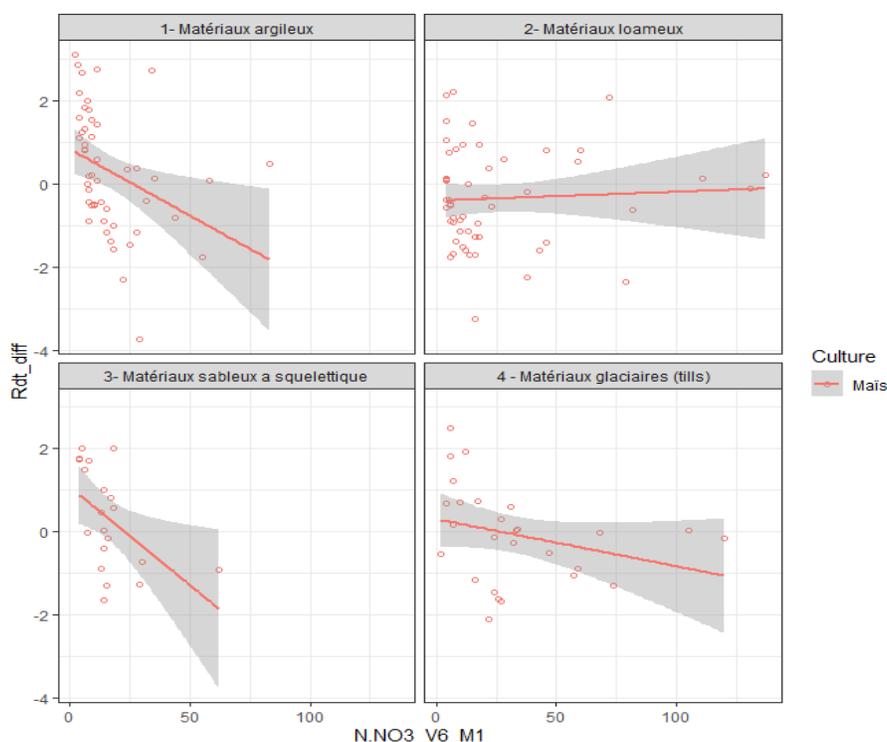


Figure 14: Relation entre la teneur en nitrates en post levée du maïs et la réponse du maïs à la fertilisation azotée.

4.6 Relation entre le soufre dans la biomasse et le rendement

Dans le but d'évaluer si des déficiences en soufre étaient perceptibles dans les essais, les teneurs en soufre mesurées dans le sol au printemps ont été mises en relations avec les teneurs en soufre total dans la biomasse (Figure 15). Une autre comparaison a aussi été faite entre le soufre dans la biomasse et le rendement mesuré (Figure 16). Dans tous les matériaux sauf les sols loameux, il semble y avoir une relation positive entre le soufre dans le sol au printemps et le soufre dans la biomasse dans les deux cultures. Ces relations positives indiquant que les concentrations en soufre dans la plante sont conditionnées par la teneur en soufre dans le sol, pourraient signifier que certains sols sont déficitaires en S et ces déficiences apparaissent dans plusieurs types de sols. La pente étant plus prononcée dans les prairies et les sols développés sur matériaux sableux, les déficiences en S pourraient être plus importantes, tandis que la pente moins prononcée dans les matériaux glaciaires pour les prairies indique de plus faibles risques de déficience. Dans les sols loameux, les signes de déficiences n'ont pas été mis en évidence.

La relation entre le soufre total dans la biomasse et le rendement des cultures est contradictoire selon les cultures (Figure 16). Elle aurait tendance à être positive dans le maïs et négative dans le cas des prairies. Il y a peu de conclusions à tirer de ces relations.

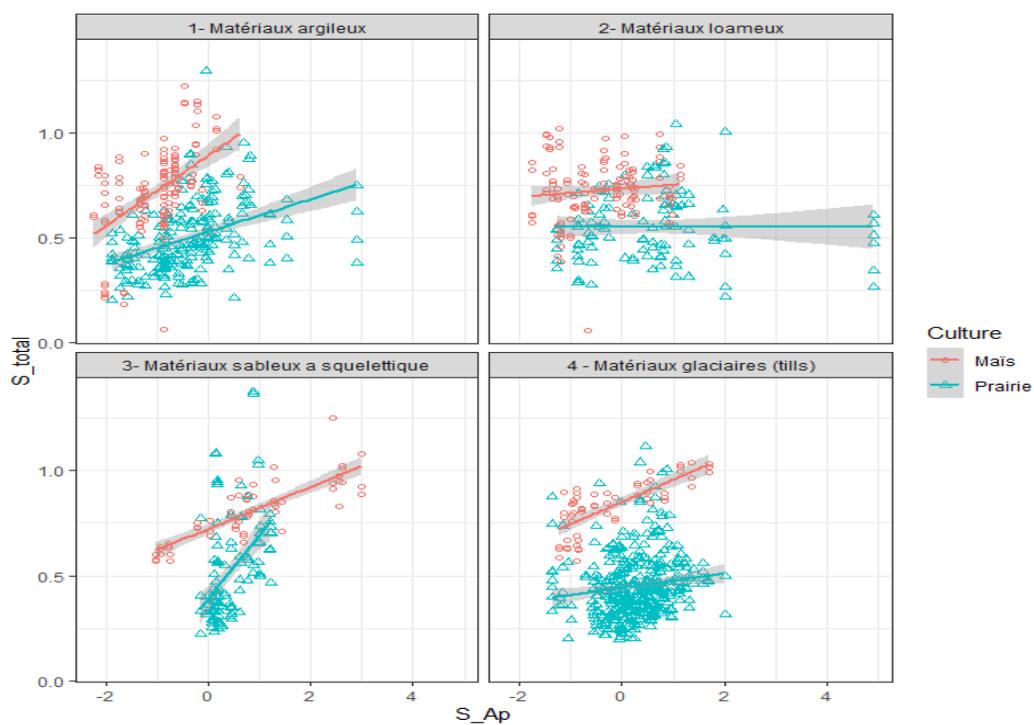


Figure 15: Relations entre le soufre dans le sol et le soufre dans la plante.

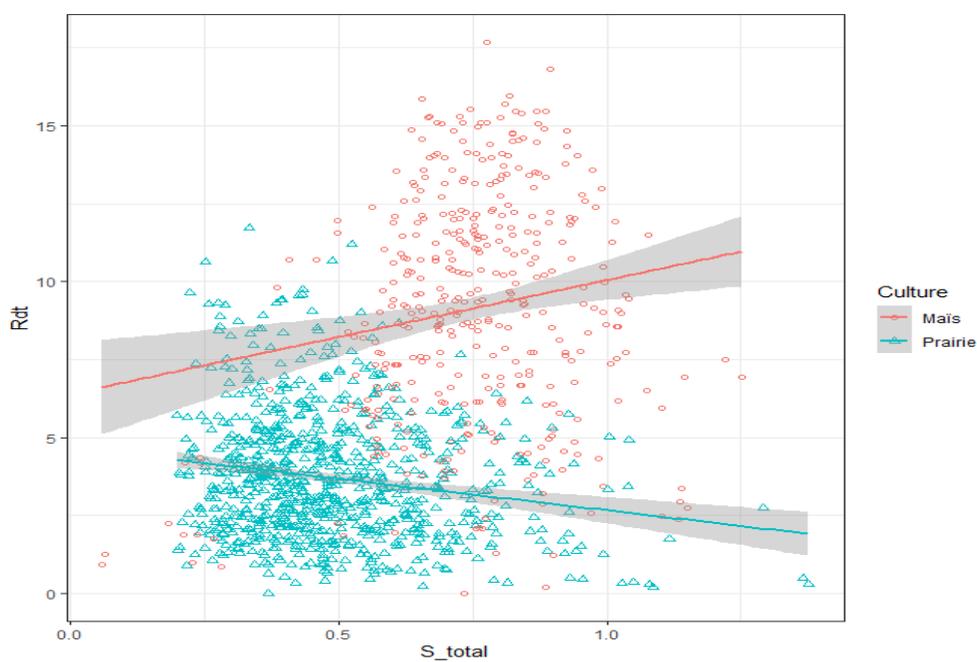


Figure 16: Relations entre le soufre dans la biomasse et le rendement.

5. CONCLUSION

Dans les différents scénarios étudiés, les variables climatiques semblent avoir moins d'effet sur la variance expliquée que les paramètres du sol (environ 11% dans le maïs et moins de 1% dans les prairies). Ces résultats diffèrent des observations de Wade en 2010. En effet, en comparant les effets des indicateurs de santé biologique des sols et les variables climatiques, Wade avait conclu que les effets du climat étaient prépondérants dans la réponse du maïs à l'azote. Les expériences de Wade se sont déroulées sur différents sites avec des doses variables préétablies, alors que dans nos essais en maïs, contrairement aux prairies, les doses d'engrais ont été fixés par les producteurs. Nous avons observé une certaine corrélation entre les doses d'engrais apportés et les UTM, ce qui suppose que les producteurs prennent déjà en compte en quelque sorte les variables climatiques dans leurs pratiques culturales (choix d'hybrides, dose N appliquée, etc.). Cela peut expliquer le faible poids des effets des variables climatiques sur la variance expliquée, puisqu'ils sont dissimulés dans les autres variables.

Les paramètres des horizons Ap1 et Ap2 semblent influencer le rendement des cultures beaucoup plus que les paramètres de l'horizon B. Ces horizons de surface correspondent aux profondeurs où la plante puise la grande partie de ses différents nutriments. Les producteurs ont donc intérêt à maintenir la santé des sols particulièrement dans ces horizons.

Dans le maïs, les UTM, la stabilité des agrégats, le manganèse et la respiration microbienne se démarquent comme variables influençant le plus les rendements sans engrais. L'influence des UTM de la région sur le choix des hybrides et de leur potentiel de rendement est bien connue. Les moyennes des rendements régionaux de la FADQ illustrent aussi très bien comment les rendements sont plus élevés dans les régions les plus chaudes.

Sur deux années d'expérience pour déterminer l'optimum économique dans le maïs au Québec, Nyiraneza (2010) a rapporté que les UTM étaient toujours liés au rendement optimum économique. Selon Lobell et Asner (2003), cités par Nyiraneza, dans une étude sur 10 ans pour comparer le rendement et les variables climatiques au Québec, les UTM était la seule variable climatique corrélée. Cela concorde avec nos résultats, puisque que le bilan hydrique n'est pas sorti comme facteur influençant les rendements. Dans une autre étude, Tremblay et al., 2012, ont bien démontré l'importance de la répartition des précipitations durant la saison de croissance, sur la réponse du maïs à la fertilisation azoté et sa productivité. Outre le bilan hydrique nous n'avons pas inclus cette variable climatique dans l'analyse qui pourrait s'avérer influente.

L'activité biologique a aussi son rôle sur la minéralisation de l'azote (Honeycutt et Potaro, 1990; Dharmakeerthi et al., 2005). La capacité du sol à dégager du CO₂ en incubation a été étroitement reliée au potentiel de minéralisation de l'azote (Franzluebbers, 2020) et nous l'avons également observé dans l'EESSAQ (Gasser et al., 2023). Une meilleure stabilité des agrégats est aussi reliée à un meilleur rendement sans engrais et à l'inverse à une moins grande réponse aux engrais. Ces relations témoignent quelque peu de l'importance de la capacité du sol à minéraliser de l'azote sous la forme du potentiel de respiration en CO₂ et de la stabilité structurale du sol.

Contrairement aux essais en maïs, les variables climatiques semblent très peu reliées à l'expression du rendement sans engrais ou de la réponse aux engrais des prairies. Les variables prépondérantes sont la texture (sable et argile), les éléments de chimie et de fertilité, la masse volumique apparente, la capacité au champ, le diamètre pondéré des agrégats et les nitrates mesurés au printemps.

La texture est particulièrement importante vu son importance sur la matière organique dans le sol (Bird et al., 2000), la minéralisation de l'azote, (Ros et al., 2011; St. Luce et al, 2014), l'activité microbienne (Franzluebbers et al., 1996), et la disponibilité de l'eau (Cambouris et al., 2016).

Les effets des différents éléments disponibles ressortis de l'analyse par corrélation canonique (P, Al, Fe, Mn, Zn) variaient selon les différents matériaux parentaux et rendaient leur interprétation quelque fois incohérente.

Dans les prairies, les variables ressorties de l'analyse canonique (dégagement de CO₂, stabilité des agrégats) avaient beaucoup plus d'influence sur le rendement sans engrais dans les matériaux loameux, sableux à squelettiques et glaciaires, alors que ces mêmes variables influencent davantage la réponse aux engrais dans les matériaux sableux à squelettiques.

Les teneurs en nitrate dans le sol au printemps et en post levée dans le maïs demeurent des indicateurs plus reliés à la réponse aux engrais que l'indice nutrition azotée, mais la relation n'est pas la même dans tous les types de sols et il demeure à éclaircir pourquoi certains sites répondent encore à des apports en engrais alors que les teneurs en nitrate sont très élevées dans le sol. En corollaire à cette étude il a aussi été possible de mettre en évidence des situations où les teneurs en S pourraient être limitantes, dans les sols argileux et sableux à squelettique en particulier, en comparant les teneurs en soufre dans les sols et les concentrations de soufre dans la plante.

Il a été plus évident d'établir des liens entre les variables pédoclimatiques dont celles reliées à la santé de sols et le rendement sans engrais que d'établir des liens avec la réponse aux engrais. Malgré la quantité considérable d'information générée et utilisée pour développer ces relations, le nombre d'observations (107 sites-années) n'était peut-être pas suffisant pour couvrir toutes les conditions pédoclimatiques de bases dans les deux cultures, permettant d'isoler les effets de la santé des sols. Il devient donc difficile d'utiliser cette information pour développer un indicateur de santé des sols basé sur la réponse des cultures aux engrais, du moins les relations obtenues seraient plus fortes pour prédire le rendement sans engrais et non la réponse aux engrais. Toutefois, la santé des sols demeure un enjeu important pour maintenir la productivité des cultures et obtenir un bon rendement. Il est donc toujours nécessaire d'encourager les producteurs à maintenir les bonnes pratiques de conservations de sols.

RÉFÉRENCES

- Angus J.F., 1995. Modeling N fertilization requirements for crops and pastures. *In* Bacon PE, eds. Nitrogen fertilization in the environment. New York : Marcel Dekker, Inc., 109 – 127.
- Banks, S. 2019. Perfectionner les stratégies sur l'azote dans la culture du maïs. Ministère de l'agriculture, de l'alimentation et des affaires rurales de l'Ontario (MAAARO), disponible au <http://www.omafra.gov.on.ca/french/crops/field/news/croptalk/2019/ct-0319a6.htm>. Consulté le 3 décembre 2019.
- Blackmer, A.M. et White, S.E. 1998. Using precision farming technologies to improve management of soil and fertilizer nitrogen. *Aust. J. Agric.Res.*, 49:555–564.
- Breland, T.A. et S. Hansen. 1996. Nitrogen mineralization and microbial biomass as affected by soil compaction. *Soil Biol. Biochem.*, 28: 655–663.
- Cambouris A.N., Ziadi N., Perron I., Khaled D. Alotaibi, Mervin St. Luce et Tremblay, N. 2016. Corn yield components response to nitrogen fertilizer as a function of soil texture. *Can. J. Soil Sci.*, 96: 386-399.
- Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ). 2010. Guide de référence en fertilisation. 2^e édition. 473 pages.
- Dalal, R. C., Wang, W., Allen, D. E., Reeves, S. et Menzies, N. W. 2011. Soil & Water Management & Conservation Soil Nitrogen and Nitrogen-Use Efficiency under Long-Term No-till Practice. *Soil Sc. Soc. Am. J.*, 75: 2251–2261. <https://doi.org/10.2136/s55aj2010.0398>.
- Dharmakeerthi, R.S., Kay, B.D. et Beauchamp, E.G. 2005. Factors contributing to changes in plant nitrogen across a variable landscape. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 69:453–462.
- Durand, S., Breune, I. et Parent, G. 2018. Utilisation de l'indice de nutrition azoté pour optimiser la fertilisation dans le maïs fourrager et les prairies produit dans la région de l'Estrie. Fiche synthèse du projet 14-GES-01 financé par le Programme Prime-vert du MAPAQ. 3 pages.
- Eaton, A.D., Clesceri, L.S., Rice, E.W. et Greenberg, A.E. 2005. Standard methods for examination of waste and wastewater, 21th Edition. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation. ISBN 0-87553-047-8.
- Franc, J, 1996. La fumure azotée appliquée au stade dernière feuille en froment d'hiver. TFE. FUSAGx, 88 pages.
- Franzluebbers, A.J. 2020. Soil carbon and nitrogen mineralization after the initial flush of CO₂. *Agricultural & Environmental Letters*. 5. 10.1002/ael2.20006.
- Franzluebbers, A.J., Hons, F.M. et Zuberer, D.A. 1995. Tillage and crop effects on seasonal soil carbon and nitrogen dynamics. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 59: 1618–1624 doi:10.2136/sssaj1995.03615995005900060016x.
- Franzluebbers, A.J. et Stuedemann, J.A. 2015. Does grazing of cover crops impact biologically active soil carbon and nitrogen fractions under inversion or no tillage management? *J. Soil Water Cons.*, 70 : 365–373.
- Gasser, M.-O., S. Martel, M.-H. Perron et C. Dufour-L'Arrivée. 2014. Réduire les apports en azote et les émissions de GES en incorporant rapidement les lisiers en présemis des cultures annuelles. Rapport final déposé au MAPAQ en vertu du programme Prime-Vert, sous-volet 8.4. Agrinova, Québec. 24 p. + annexe.

- Gasser, M.-O., Bossé C., Clément, C.C., Bernard, C., Mathieu, J.-B., Tremblay, M.-E. 2023. Rapport 1 de l'Étude sur l'état de santé des sols agricoles du Québec : État de santé des principales séries de sols cultivées. Rapport final présenté au ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation (MAPAQ). IRDA. 186 pages.
- Gasser, M.-O., Clément, C.C., Mathieu, J.-B., Chavez, E., Bossé C., Bernard, C. et Tremblay, M.-E. 2023. Rapport 2 de l'Étude sur l'état de santé des sols agricoles du Québec : Effets des pratiques agricoles et des conditions biophysiques sur la santé des sols et la productivité des cultures. Rapport final. IRDA et partenaires. 54 pages.
- Gastal, F., Lemaire, G., Durand, J. L. et Louarn, G. 2015. Quantifying crop responses to nitrogen and avenues to improve nitrogen-use efficiency. In *Crop Physiology: Applications for Genetic Improvement and Agronomy: Second Edition* (pp. 161–206). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-417104-6.00008-X>.
- Greenberg, A.E., Clesceri, L.S. et Eaton, A.D. 1992. Standard Methods for examination of waste and wastewater, 18th Edition. ISBN 0-87553-207-1.
- Honeycutt, C.W. et Potaro, L.J. 1990. Field evaluation of heat units for predicting crop residue carbon and nitrogen mineralization. *Plant Soil*, 125: 213–220. <https://www.pgq.ca/media/1762613/donnees-production-region-administrative-quebec.xlsx>.
- Kachanoski R.G., O'Halloran I.P. , Aspinall D. et Von Bertoldi P. 1996. Delta Yield: Mapping Fertilizer Nitrogen Requirement for Crops. *Better Crops/Vol 80* (1996, No. 3, pp. 20-23)
- Kay, B.D., Mahboubi, A.A., Beauchamp, E.G. et Dharmakeerthi, R.S. 2006. Integrating soil and weather data to describe variability in plant available nitrogen. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 70: 1210–1221.
- Lacroix, C.R. et Abarza, E. 2002. Raisonner la fertilisation du fraisier : Le test pétiolaire nitrates, un outil d'aide. *Infos-Ctifl*. 179 : 44-48.
- Maltas, A., Charles, R., Jeangros, B. et Sinaj, S. 2013. Effect of organic fertilizers and reduced-tillage on soil properties, crop nitrogen response and crop yield: Results of a 12-year experiment in Changins, Switzerland. *Soil Till. Res.*, 126: 11–18. <https://doi.org/10.1016/j.still.2012.07.012>.
- Malhi, S. S. et Nyborg, M. 1990. Effect of tillage and straw on yield and N uptake of barley grown under different N fertility regimes. *Soil Till. Res.*, 17: 115-124.
- Nyiraneza, J., Cambouris, A.N., Ziadi, N., Tremblay, N. et Nolin, M.C. 2012. Spring wheat yield and quality related to soil texture and nitrogen fertilization. *Agron. J.*, 104: 589–599. doi:10.2134/agronj2011.0342.
- Nyiraneza, J., Chantigny, M.H., N'Dayegamiye, A. et Laverdière, M.R. 2009. Dairy cattle manure improves soil productivity in low residue rotation systems. *Agron. J.*, 101: 207–214. doi:10.2134/agronj2008.0142.
- Nyiraneza, J., N'Dayegamiye, A., Gasser, M.O., Giroux, M., Grenier, M., Landry, C. et Guertin, S. 2010. Soil and crop parameters related to corn nitrogen response in Eastern Canada. *Agron. J.*, 102: 1478-1490. doi:10.2134/agronj2009.0458.
- Tran, T.S., Giroux, M., Guilbault, J. et Audesse, P. 1990. Evaluation of Mehlich-III extractant to estimate the available P in Québec soils. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.*, 21: 1-28.
- Samson, M. E., Menasseri-Aubry, S., Chantigny, M. H., Angers, D. A., Royer, I. et Vanasse, A. 2019. Crop response to soil management practices is driven by interactions among practices, crop species and soil type. *Field Crops Research*, 243. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.107623>.
- Scharf, P.C., Wiebold, W.J. et Lory, J.A. 2002. Corn yield response to nitrogen fertilizer timing and deficiency level. *Agron. J.*, 94: 435–441.

- Scott, N.A., Cole, C.V., Elliott, E.T. et Huffman, S.A. 1996. Soil textural control on decomposition and soil organic matter dynamics. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 60: 1102–1109.
- Sogbedji, J.M., Van Es, H.M., Klausner, S.D., Bouldin, D.R. et Cox, W.J. 2001. Spatial and temporal processes affecting nitrogen availability at the landscape scale. *Soil Tillage Res.*, 58: 233–244. doi:10.1016/S0167-1987(00)00171-9.
- Tremblay, N., Bouroubi, Y.M., Bélec, C., Mullen, R.W., Kitchen, N.R., Thomason, W.E., Ebelhar, S. 2012. Corn Response to Nitrogen Is Influenced by Soil Texture and Weather. *Agronomy Journal*, 104, 1658-1671. <http://dx.doi.org/10.2134/agronj2012.0184>
- Wade, J., Culman, S.W., Logan, J. A. R., Poffenbarger, H., Demyan, M. S., Grove, J.H., Mallarino, A.P. McGrat, J.M., Ruark, M et West, J.R. 2020. Improved soil biological health increases corn grain yield in N fertilized systems across the Corn Belt. *Sci. Rep.*, 10: 917. doi: 10.1038/s41598-020-60987-3.
- Ziadi, N., Cambouris, A.N., Nyiraneza, J. et Nolin, M.C. 2013. Across a landscape, soil texture controls the optimum rate of N fertilizer for maize production. *Field Crops Res.*, 148:78–85. doi:10.1016/j.fcr.2013.03.023.

ANNEXE A

Dose de N appliquée dans le maïs

Tableau 10 : Doses de N appliquées dans le traitement M3 en maïs.

ID Site	2020	2021	2022
	----- kg N/ha -----		
17AHG10		196	
17AHG17	202		204
17COP14			189
17DBY02		159	
17MOI04		204,4	
17SBR01		285	188
17SBR04	217	225	216
17SCS01		174	
17SIT12	234		
17SYT11	232	243	240
17SYT14	308		
18BDF12	116		
18CIS04	0	149	
18DHU11		235	
18GEB31		166	195
18LPC05	159		134
18LVD07	101	158	
18LVD23			210
18PVD04	235		238
18RDU01	156		
18RMB13			202
18SAB15			250
18SBO11		178	
18SEG08		231	
18SUB13		246	
22SSL03			268
22SSL04			343
22SUB01			440
22SUB03			65
22SUB04			265
22SUB05			251

Dose de N appliquée dans les prairies

Tableau 11 : Doses de N appliquées dans le traitement P2 en prairies.

ID_Site	2020	2021	2022
	----- kg N/ha -----		
17AMQ04	160		
17COM05	160	200	
17COM11	160	200	160
17COM12	160	200	
17NMD04	200	160	
17NMD06	200	160	
17QSB14	100	100	
17SDR17		160	
17SIB15		160	160
17SIT14	200		
17SJU02		160	100
17TLL15	100		
18CHP04	100	160	160
18CHP14	160	160	
18CIS05	100	100	160
18CIS12		160	160
18CVX03	100	100	100
18CVX13	100		
18DLS04			160
18DUA21			200
18GEB02		160	160
18LED09	160	160	
18LED14		160	100
18LPC30	160	160	160
18MWO21	160		
18PML05		160	160
18RMB17		100	100
18ROQ02	160	160	160
18SSC35	200	160	160
18STE10	160	160	160
19LBS16			200
19LBS28	160	160	160
19VAR20		160	160

ANNEXE B

Corrélations de Pearson entre variables de l'horizon Ap1, réponses aux engrais (différence de rendement) et rendements sans engrais

Corrélations de Pearson dans les essais en maïs

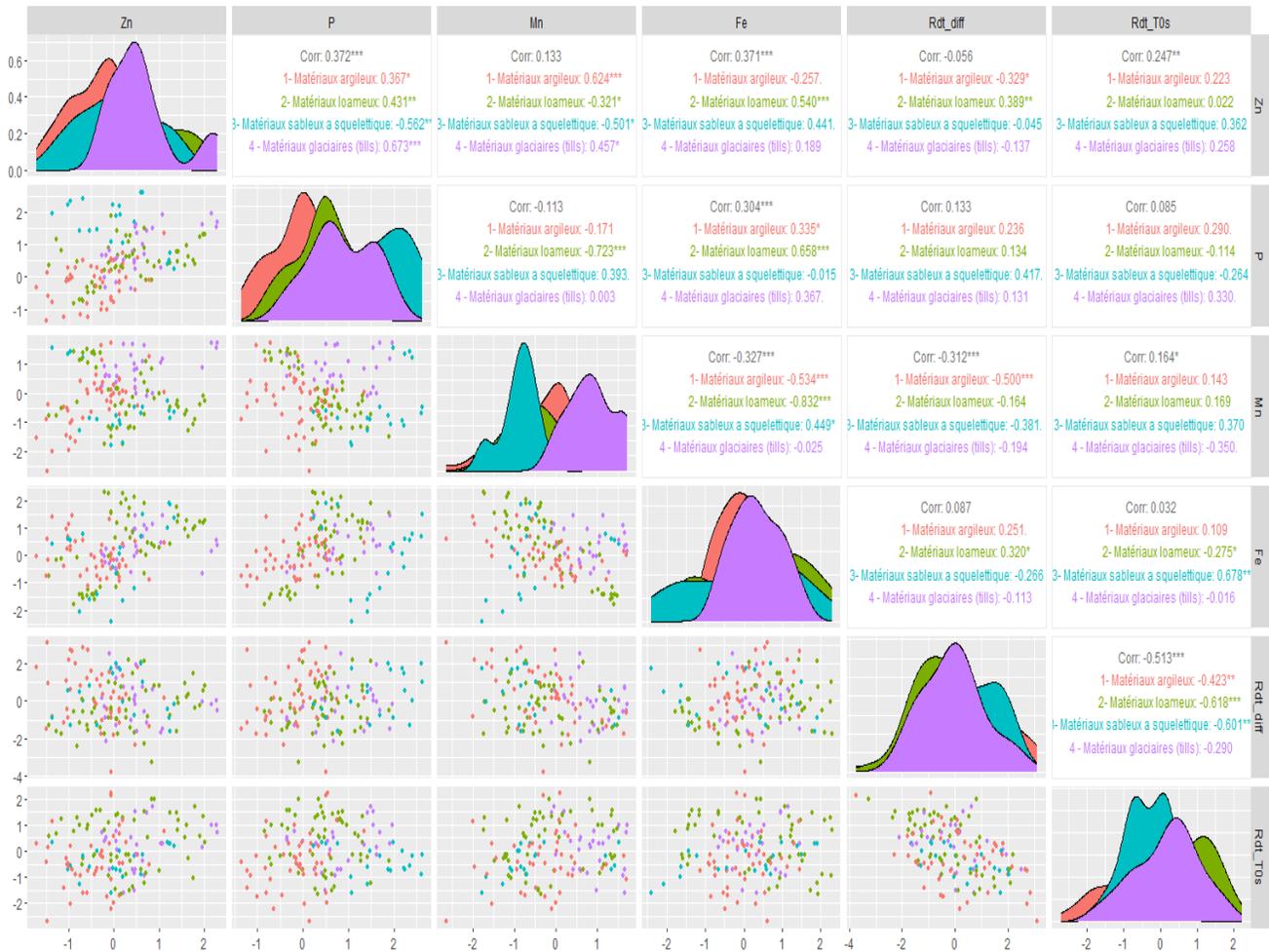


Figure 17 : Influence des variables canoniques dans le maïs selon les matériaux parentaux dans l'Ap1 (1).

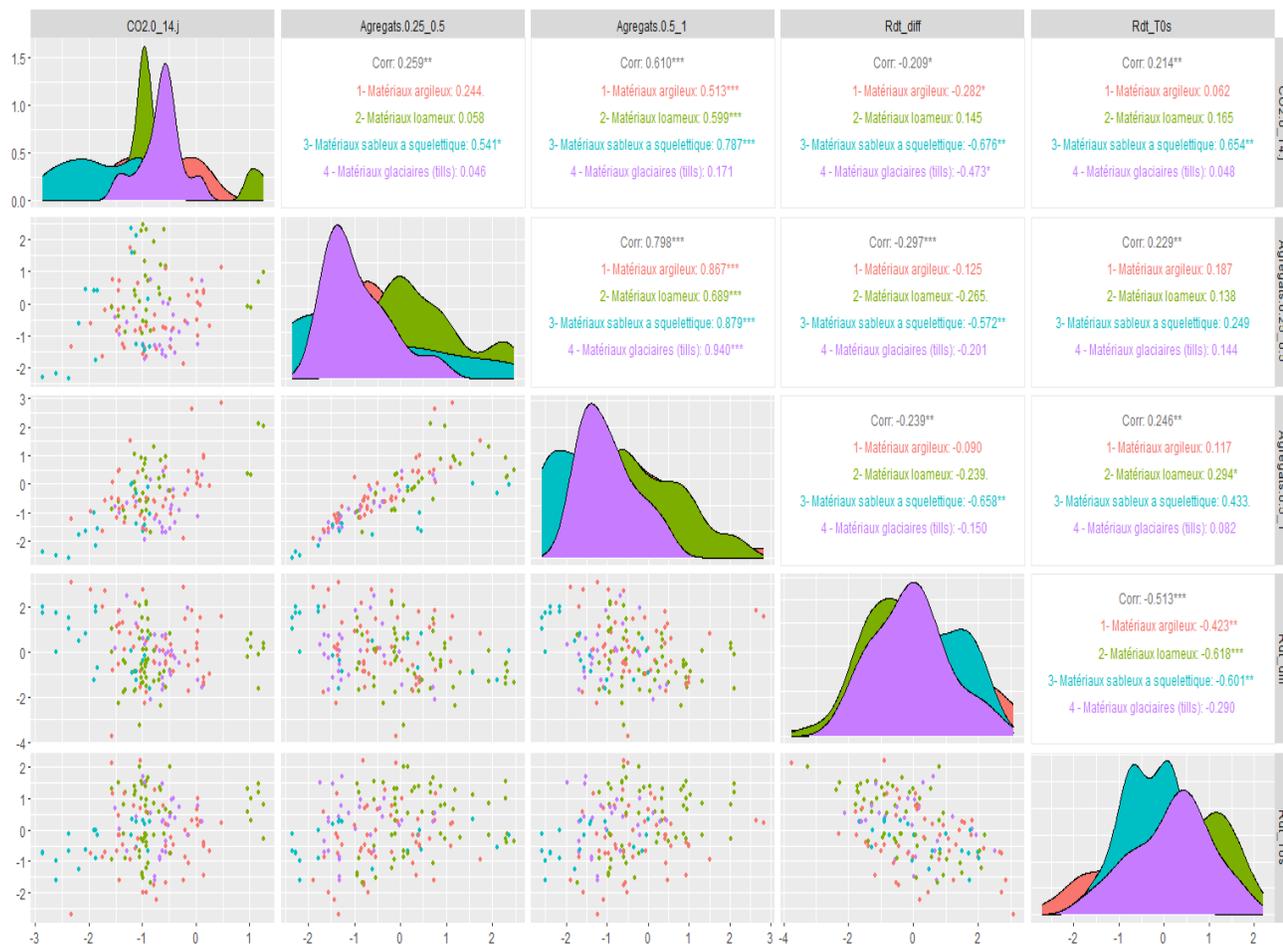


Figure 18 : Influence des variables canoniques dans le maïs selon les matériaux parentaux dans l'Ap1 (2).

Corrélations de Pearson dans les essais en prairie



Figure 19 : Influence des variables canoniques dans les prairies selon les matériaux parentaux dans l'Ap1 (1).



Figure 20 : Influence des variables canoniques dans les prairies selon les matériaux parentaux dans l'Ap1 (2).



Figure 21 : Influence des variables canoniques dans les prairies selon les matériaux parentaux (3).