

RÉPONSES DES CULTURES AUX ENGRAIS COMME INDICATEUR DE SANTÉ DES SOLS

Auteurs : Marc-Olivier Gasser, Nyck Rochel Occéan, Jean-Benoît Mathieu et Mick Wu

INTRODUCTION

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 les principales séries de sols cultivées au Québec. Au cours de cette étude plusieurs indicateurs révélant la condition physique, la biochimie du carbone et de l'azote, de même que la chimie-fertilité du sol ont été mesurés à trois profondeurs, sur quatre points d'échantillonnage (4) et sur plusieurs sites à travers le Québec. Cette caractérisation est apparue idéale pour évaluer comment la réponse des cultures à la fertilisation azotée est reliée à ces indicateurs et à l'inverse, comment cette réponse des cultures aux engrais pouvait servir d'indicateur pour détecter des problèmes de santé des sols. La mise en place de parcelle d'essais chez les producteurs pour évaluer la réponse aux engrais apparaissant comme une voie idéale pour sensibiliser les producteurs à évaluer l'état de santé de leurs sols et de son effet sur la productivité des cultures.

OBJECTIFS

Le projet visait 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 l'état de santé du sol, lorsque les analyses courantes de sol n'indiquent aucun problème. 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.

MÉTHODOLOGIE

A) Sélection des sites et dispositifs expérimentaux

De 2020 à 2022, 41 essais de réponses aux engrais dans le maïs et 66 dans des prairies ont été réalisés sur les sites de l'EESSAQ caractérisés en 2018 ou 2019. Sur chaque site, des parcelles sans engrais et avec engrais azotés ont été installées à proximité des quatre points d'échantillonnage (PE) de l'EESSAQ, pour un total de 421 blocs de traitements.

Dans les essais en maïs, trois niveaux de fertilisation en azote ont été comparés: un témoin sans engrais azoté, un apport d'engrais de démarrage au semis seulement et un apport d'engrais de démarrage avec un apport d'engrais en post levée :

soit la dose appliquée par le producteur. Dans les essais en prairies de graminées, deux niveaux de fertilisation ont été comparés : un témoin sans engrais N et la fertilisation azotée recommandée par le GREF (CRAAQ, 2010) selon le nombre de coupes.

B) Échantillonnage, mesures de rendement et analyses

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 pour les analyses courantes de chimie-fertilité (pH, pH SMP, teneurs en P, K, Ca, Mg, Fe, Al, Mn, Zn et Cu extraits Mehlich-3) et de l'azote minéral (N-NO₃ et N-NH₄). Les teneurs en nitrates dans le sol ont été évaluées en post levée du maïs au stade V6 et l'indice de nutrition azotée a été déterminé dans le feuillage au stade V12 du maïs. Le rendement du maïs-grain et du maïs-ensilage a été déterminé en fin de saison sur trois longueurs de 3 m linéaire de rang. Pour les prairies, les biomasses ont été prélevées et la composition botanique a été déterminée dans trois quadrats de 1 m² à chaque coupe de foin. Des sous-échantillons de biomasses ont été envoyés au laboratoire pour détermination des teneurs en matière sèche, C et N total. L'indice de nutrition azotée a été calculé dans la biomasse des prairies à chaque coupe de foin. 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.

C) Analyses statistiques

L'analyse exploratoire des liens entre la réponse des cultures aux engrais et les variables liées aux sols et au climat a été conduite par corrélations canoniques, dans lesquels le rendement sans engrais et la réponse aux engrais (différence entre le rendement à pleine dose d'engrais azoté et le rendement sans engrais) ont été considérées comme variables de réponses. Les unités thermiques maïs-grain (UTM) et le bilan hydrique (précipitations totales moins évapotranspiration potentielle) durant la saison de croissance ont servi de variables climatiques explicatives et les propriétés des sols mesurées dans le cadre de l'EESSAQ ont servi de variables de santé des sols explicatives, sauf dans l'horizon Ap1 où les propriétés de chimie-fertilité du sol mesurées au printemps de l'essai, sur les mêmes PE, les ont remplacées. Aussi, 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.

PRINCIPAUX RÉSULTATS

Dans le maïs, la première composante relie principalement le rendement sans engrais aux UTM, à la proportion d'agrégats stables < 1 mm, à la capacité du sol à dégager du CO₂ et à la teneur en Zn dans l'horizon Ap1 (Tableau 1). La deuxième composante relie principalement la réponse aux engrais aux UTM, à la proportion d'agrégats stables entre 0,25 et 0,5 mm (négativement) et aux teneurs en Mn (négativement) et en P dans l'horizon Ap1. Dans les horizons Ap2 et B, la plupart des mêmes variables interviennent, mais dans un effet moindre. Les corrélations simples avec quelques indicateurs sélectionnés du sol démontrent que la capacité du sol à dégager du CO₂ en incubation (ou sa capacité de minéraliser N) ainsi qu'un sol mieux structuré a plus d'impact dans les sols sableux à squelettiques que dans les autres sols (Tableau 2). Les autres éléments (P, Zn, Fe, Mn extraits Mehlich-3) ont des corrélations plus ou moins importantes dans les différents matériaux sans réels cohérences. La corrélation négative entre Mn et la réponse aux engrais est la même pour tous les matériaux, mais elle est plus élevée dans les sols argileux. 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 Sainte-Rosalie et Saint-Urbain, entre autres. 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? À l'inverse, le maïs qui répond davantage aux apports de N dans les sols argileux et sableux avec des teneurs plus élevées de P indiquent-ils des problèmes d'insuffisance en P ou de santé des sols liés à la compaction et aux des apports répétés en engrais de ferme?

Dans les prairies de graminées, la première composante relie principalement le rendement sans engrais au contenu en argile, à la masse volumique apparente (MVA) (négatif), à la capacité en eau relative (WFPS), au diamètre moyen des agrégats (DMP), au dégagement de CO₂ (négatif), à la teneur en N-NO₃ au printemps, au pH tampon SMP, ainsi qu'aux teneurs en P, K, Mg, Na, B, Al (négatif) et Fe extraits Mehlich-3 dans l'horizon Ap1. La deuxième composante reliant principalement la réponse aux engrais est très peu reliée aux conditions pédoclimatiques. Dans les horizons Ap2 et B, la plupart des mêmes variables interviennent, mais dans un effet moindre. Les corrélations simples avec quelques indicateurs sélectionnés du sol démontrent que la teneur en argile, les teneurs en N-NO₃ en éléments P, K, Cu et le pH SMP sont positivement corrélées au rendement sans engrais plus souvent dans les sols sableux, indiquant l'importance de maintenir des bonnes conditions de chimie-fertilité dans ces sols plus particulièrement (Tableau 3). Dans les matériaux loameux, les corrélations positives avec la MVA et les teneurs en Cu sont plutôt inattendues, tandis que la corrélation négative avec les teneurs en Al est attendue. Les corrélations avec la réponse aux engrais par matériaux sont aussi plus ténues et peu interprétables.

Tableau 1 : Corrélations canoniques entre les variables de réponses aux engrais du maïs et des prairies de graminées et les conditions pédoclimatiques dans trois horizons.

	Maïs		Ap1		Ap2		B			Prairie		Ap1		Ap2		B	
	Variable 1	Variable 2	Variable 1	Variable 2	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		Rendement sans engrais	0,95	-0,30	0,91	-0,42	0,92	-0,40		
	Réponse aux engrais	-0,46	0,89	-0,32	0,95	-0,08	1,00		Réponse aux engrais	0,00	1,00	0,12	0,99	0,11	0,99		
Variables climatiques	UTM	0,31	0,26	0,34	0,20	0,38	0,12	UTM	0,16	0,03	0,06	0,02	0,16	0,01			
	Bilan hydrique	0,05	-0,18	0,03	-0,18	-0,02	-0,19	Bilan hydrique	-0,13	-0,01	-0,14	0,02	-0,14	-0,02			
Variables physiques du sol	Sable	0,09	0,04	0,09	0,01	0,02	0,02	Sable	-0,23	0,02	-0,19	0,03	-0,25	0,02			
	Argile	-0,02	0,01	-0,01	0,04	0,01	0,04	Argile	0,32	0,08	0,32	0,06	0,34	0,05			
	MVA	-0,08	0,05	-0,12	0,06	0,05	0,10	MVA	0,26	-0,07	0,24	-0,08	0,16	-0,15			
	Macroporosité	0,01	0,07	0,04	0,04	-0,04	-0,12	Macroporosité	-0,17	0,08	-0,02	0,07	-0,16	0,06			
	WFPS	-0,04	0,13	-0,07	0,11	-0,02	0,02	WFPS	0,24	0,08	0,21	0,06	0,21	0,16			
	DMP	-0,05	0,03					DMP	0,26	-0,03							
	Agrégats 0,25 à 0,5 mm	0,22	-0,23					Agrégats 0,25 à 0,5 mm	-0,12	0,10							
	Agrégats 0,5 à 1 mm	0,25	-0,15					Agrégats 0,5 à 1 mm	-0,09	0,07							
	Conductivité hydraulique			-0,01	0,07	-0,17	-0,06	Conductivité hydraulique			0,01	0,02	-0,20	0,03			
	C total	0,07	-0,01	0,09	0,02	-0,02	-0,09	C total	-0,15	0,07	-0,06	0,02	-0,13	0,16			
Variables de la biochimie, de la matière organique	CO ₂ dégagé	0,21	-0,13	0,22	-0,09	0,09	-0,14	CO ₂ dégagé	-0,23	0,05	-0,04	-0,05	-0,09	0,13			
	C actif	0,12	0,05	0,12	0,07	0,01	-0,03	C actif	-0,10	-0,04	-0,03	-0,13	-0,09	0,11			
	C actif / C total	0,07	0,07	0,03	0,05	0,10	0,13	C actif / C total	0,11	-0,14	0,04	0,04	0,08	-0,09			
	N-NO ₃	0,19	-0,14					N-NO ₃	0,33	-0,03							
	N-NH ₄	-0,03	0,01					N-NH ₄	-0,12	0,21							
	Nminéralisable	0,14	-0,13	0,15	-0,09	0,08	-0,04	Nminéralisable	-0,06	0,08	0,03	0,00	0,02	0,11			
	Nminéralisable /Norg	0,16	-0,15	0,14	-0,11	0,07	-0,05	Nminéralisable /Norg	0,03	-0,02	0,06	-0,08	0,13	0,04			
	pH	0,00	0,12	0,03	0,05	0,08	0,02	pH	0,10	-0,06	0,20	-0,09	0,27	-0,12			
	pH SMP	0,06	0,12					pH SMP	0,31	-0,18							
	P	0,10	0,20	0,14	0,21	0,06	0,07	P	0,35	0,04	0,34	-0,04	0,14	0,08			
Variables de chimie et fertilité	K	0,06	0,08	-0,06	0,20	-0,08	0,11	K	0,32	0,09	0,30	0,02	0,33	0,01			
	Ca	0,00	0,04	0,02	0,06	0,04	0,04	Ca	0,18	0,02	0,23	-0,06	0,29	0,01			
	Mg	-0,05	0,12	-0,04	0,15	-0,02	0,10	Mg	0,27	-0,03	0,22	-0,09	0,32	-0,05			
	Na	0,01	0,01					Na	0,24	0,14							
	S	0,08	-0,07					S	0,01	0,04							
	B	0,14	-0,02	0,09	-0,01	0,04	-0,05	B	0,31	-0,10	0,33	-0,17	0,25	-0,06			
	Al	-0,11	-0,02	-0,12	0,04	-0,10	-0,08	Al	-0,31	0,16	-0,28	0,20	-0,29	0,18			
	Fe	0,04	0,12	0,15	0,21	0,10	0,13	Fe	0,20	-0,01	0,22	-0,04	0,22	0,07			
	Cu	0,05	0,16	0,04	0,13	0,03	0,11	Cu	0,35	0,03	0,40	-0,06	0,45	-0,01			
	Mn	0,15	-0,28	0,09	-0,28	0,01	-0,24	Mn	0,17	-0,08	0,15	-0,11	0,21	-0,17			
Zn	0,25	0,07	0,19	0,04	0,06	-0,03	Zn	0,05	0,10	0,08	-0,04	0,13	-0,01				
Corrélations canoniques (R _c)	0,78	0,67	0,71	0,56	0,68	0,57	Corrélations canoniques (R _c)	0,70	0,43	0,68	0,39	0,63	0,39				
R ² ajusté du modèle	0,42		0,29		0,26		R ² ajusté du modèle	0,23		0,19		0,18					

Ces résultats démontrent que les conditions pédoclimatiques affectent à prime abord le rendement sans engrais, tandis que la réponse aux apports supplémentaires en engrais azotés en est moins affectée, du moins selon les données et l'analyse réalisée. Par ailleurs, la condition de chimie-fertilité du sol affecte moins le rendement sans engrais du maïs que celui des prairies. Les besoins du maïs en éléments nutritifs (chimie-fertilité du sol) sont donc plus souvent couverts, tandis que ceux des prairies sont plus souvent limitants.

Tableau 2 : Corrélations simples entre les variables de réponses aux engrais du maïs et des indicateurs sélectionnés de santé des sols par matériaux.

Variables	Tous matériaux	Argileux	Loameux	Sableux à squelet.	Glaciaires
	Rendement sans engrais				
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
P	0,09	0,29	-0,11	-0,26	0,33
Zn	0,25*	0,22	0,02	0,36	0,26
Mn	0,16*	0,14	0,16	0,37	-0,35
Fe	0,03	0,11	-0,28*	0,68*	-0,02
Réponse aux engrais					
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
P	0,13	0,24	0,13	0,41	0,13
Zn	-0,06	-0,33*	0,39*	-0,05	-0,14
Mn	-0,31*	-0,50*	-0,16	-0,38	-0,19
Fe	0,09	0,25	0,32*	-0,27	-0,11

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

Tableau 3 : Corrélations simples entre les variables de réponses aux engrais des prairies de graminées et des indicateurs sélectionnés de santé des sols par matériaux.

Variables	Tous matériaux	Argileux	Loameux	Sableux à squelet.	Glaciaires
	Rendement sans engrais				
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*
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*
P	0,32*	0,12	0,35	0,63*	0,40*
K	0,27*	0,06	-0,39*	0,67*	0,15
Cu	0,32*	0,19	0,50*	0,78*	0,16
Al	-0,34*	0,06	-0,72*	-0,47*	-0,34*
Réponse aux engrais					
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*
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
P	0,04	0,09	0,23	0,33	-0,11
K	0,09	-0,04	0,10	0,52	0,04
Cu	0,03	-0,23	0,18	0,29	0,06
Al	0,14*	0,14	0,22	-0,3*	-0,23*

Selon la littérature, la relation attendue entre la réponse aux engrais et les teneurs en nitrate au printemps avant les semis est négative. Plus il y a de nitrate dans le sol, moins les cultures devraient répondre à des apports en azote. Dans les matériaux argileux, la relation est négative pour les deux cultures, mais elle est plus marquée pour le maïs (Figure 1). Cette relation négative dans le maïs est aussi observée dans les tills et les matériaux sableux à squelettique. Pour ce qui est des prairies, la réponse est positive dans les sols issus de matériaux sableux à squelettique; ce qui n'est pas attendu et le même constat qu'au Tableau 1. Dans les matériaux loameux, aucune relation entre les teneurs en nitrate au printemps et la réponse aux engrais n'est observée dans les deux cultures, pas plus qu'avec l'INA (Figure 2). La relation attendue entre l'INA et la réponse aux engrais devrait être 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'est pas reliée à l'INA.

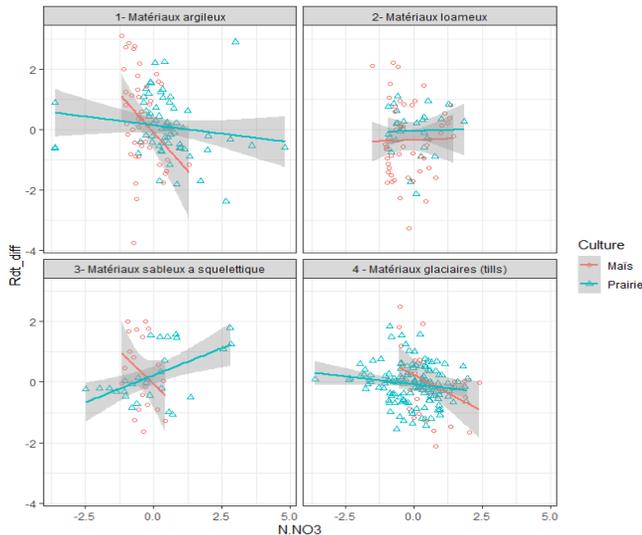


Figure 1 : Relation entre la teneur en nitrate au printemps et la réponse des cultures à la fertilisation azotée.

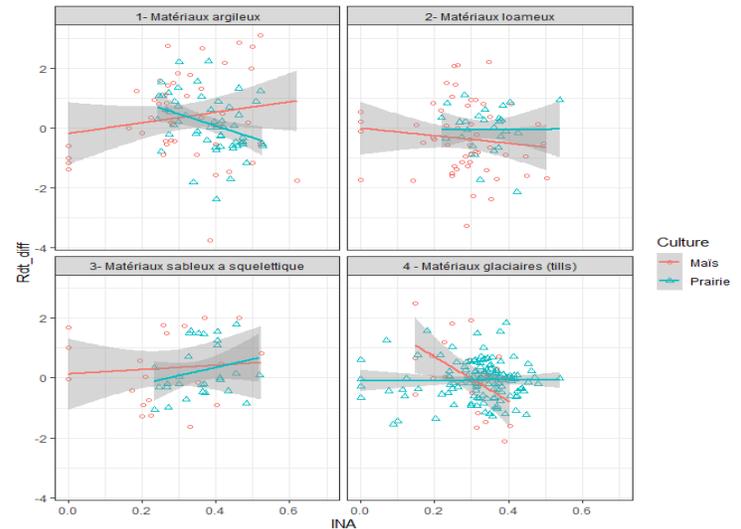


Figure 2 : Relation entre l'indice de nutrition azoté (INA) et la réponse des cultures à la fertilisation azotée.

Les teneurs en nitrate dans le sol au printemps et en post levée dans le maïs sont des indicateurs plus souvent reliés à la réponse aux engrais que l'indice de nutrition azotée, mais la relation n'est pas la même dans tous les types de sols.

Il a été plus évident d'établir des liens entre les variables pédo-climatiques dont celles reliées à la santé des sols et le rendement sans engrais que d'établir des liens avec la réponse des cultures aux apports d'engrais azotés. 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 pédo-climatiques 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 que 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 pratiquer les principes de l'agriculture régénérative et de conservations de sols.

Partenaires



Une réalisation de

Marc-Olivier Gasser, agr. Ph.D.
Nyck Rochel Occéan, agr. M.Sc.
Jean-Benoît Mathieu, M.Sc.
Mick Wu, Ph.D.

Comité d'orientation du MAPAQ

Janylène Savard, agr.
Michel Champagne, agr.
Bruce Gélinas, agr. M.Sc.
Ayitre Akpoumata agr. M.Sc.
Louis Robert, agr. M.Sc.
Gilles Tremblay, agr. M.Sc.

Des questions ?

Marc-Olivier Gasser, IRDA
418 643-2380 p. 650
marc-o.gasser@irda.qc.ca