

Projet Prime-Vert, sous-volet 8.4

Sensibiliser les producteurs à réduire les apports d'engrais azotés dans la culture de maïs succédant une prairie

Rapport final

04/2012-04/2014

Auteurs :	Marc-Olivier Gasser ¹ Stéphane Martel ² Marie-Hélène Perron ¹ Caroline Dufour-L'Arrivée ¹
Coordination :	Stéphane Martel ² Marie-Hélène Perron ¹ Caroline Dufour-L'Arrivée ¹
Partenaires de réalisation :	Les conseillers et conseillères en agroenvironnement de Chaudière-Appalaches Louis Robert, MAPAQ ³
Équipe technique :	Marc Beaulieu ⁴ Catherine Bossé ⁵ Nadine Labrecque ⁴ Michel Lemieux ¹



Ce projet a été réalisé en vertu du programme Prime-Vert, sous-volet 8.4, et bénéficie d'une aide financière provenant du Fonds vert du gouvernement du Québec et administrée par le Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec.

¹ Institut de recherche et développement en agroenvironnement

² Agrinova

³ Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec

⁴ Groupe conseil agricole de la Côte-du-Sud

⁵ Club de fertilisation de la Beauce

AVERTISSEMENT

Les résultats, opinions et recommandations exprimés dans ce rapport émanent des auteurs et n'engagent aucunement le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation.

REMERCIEMENT

Les auteurs tiennent à remercier tous les partenaires impliqués dans la réalisation de ce projet soit en premier lieu les conseillers et conseillères en agroenvironnement de la région de Chaudière-Appalaches qui sont à l'origine du projet et les producteurs agricoles qui ont collaboré à l'étude. Finalement, les auteurs tiennent aussi à remercier Louis Robert, conseiller régional du MAPAQ en Chaudière-Appalaches.

FAITS SAILLANTS

Quatorze essais de fertilisation ont été réalisés chez des producteurs agricoles de Chaudière-Appalaches en 2012 et 2013. L'objectif du projet consistait à sensibiliser les producteurs et à démontrer par des essais à la ferme qu'il y a moyen de réduire substantiellement les apports d'engrais dans les cultures succédant une prairie et ainsi réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES). Même pour des cultures plus exigeantes en azote comme le maïs-grain ou le maïs-ensilage, les probabilités de réponses à un apport supplémentaire d'engrais minéral azoté sont très faibles après un retour de prairie en Chaudière-Appalaches. Les sols ont des taux relativement élevés en matière organique et les prairies reçoivent fréquemment des apports d'engrais de ferme. Sur les quatorze sites d'essai menés dans la région, un seul site a démontré une réponse claire à un apport supplémentaire d'engrais minéral en 2013. La teneur en matière organique du sol de ce site était relativement plus faible (2,6 %) que celle des autres sites (> 4,5 %) et l'analyse de nitrate en postlevée du maïs (< 20 mg N-NO₃/kg) indiquait aussi des besoins supplémentaires en N. Un apport de 40 kg N/ha aurait comblé ces besoins. Aucune réponse n'a été observée en 2012, une année particulièrement chaude et sans excès de précipitations qui aura à la fois favorisé des rendements très acceptables sur la plupart des sites et favorisé la contribution du sol à la fertilisation des cultures, ce qui est corroboré par des teneurs relativement élevées de nitrate mesurées en postlevée dans le sol au mois de juin. Le climat plus froid et pluvieux de 2013 par rapport à 2012, combiné à l'épandage de lisiers de bovin laitier plus immobilisateur en N sur certains sites, pourrait expliquer certaines faibles réponses enregistrées en 2013. Un suivi des teneurs en nitrate en postlevée devrait permettre d'identifier les sites dont la réponse à l'azote serait plus probable, lorsque les teneurs en nitrate sont inférieures à 20 N-NO₃/kg.

En conclusion, le maïs a répondu à un apport d'azote supplémentaire (inférieur à 50 kg N/ha) après un retour de prairie seulement dans les sols dont la teneur en matière organique (MOS) était inférieure à 3 %. Sur les autres sols de la région dont la teneur en MOS était supérieure à 4,5 %, la réponse était pratiquement inexistante. Suite à ces résultats, des scénarios de réduction d'apport en engrais minéraux ont été envisagés par rapport aux pratiques actuelles. En limitant l'apport d'engrais au semis à moins de 50 kg N/ha ou même sans apport de N, il y aurait moyen de réduire de 50 à 150 kg N/ha les apports en engrais minéraux azotés dans le maïs sur retour de prairie, sans affecter les rendements. Ces réductions de consommation d'engrais se traduiraient par des réductions de coûts de 87 à 261 \$/ha et des réductions d'émissions de GES allant de 543 à 1630 kg éq. CO₂/ha, donc des gains économiques et environnementaux non négligeables. Une fiche technique a été produite pour transférer ces résultats aux producteurs.

OBJECTIFS ET APERÇU DE LA MÉTHODOLOGIE

L'agriculture est une source non négligeable d'émissions de GES d'origine anthropique. Au Québec, les émissions d'origine agricole représentent près de 8 % des émissions totales, soit 6,6 Mt éq. CO₂ (MDDEFP, 2013). Une part importante de ces émissions est attribuable à la consommation d'engrais azotés. En 2009, le MAPAQ estimait à 43 % la proportion des émissions agricoles reliée aux émissions de N₂O dont la plupart sont reliées à l'usage des engrais minéraux et des engrais de ferme (M.-A. Ouellet, comm. pers.). Par ailleurs, les émissions indirectes de GES liées à la fabrication des engrais minéraux ne sont pas comptabilisées dans le secteur agricole, mais plutôt dans le secteur industriel et représentent aussi une source considérable de GES. Selon une étude en France, les émissions de GES associées à la fertilisation azotée (dénitrification des sols et des eaux drainées), incluant la fabrication d'engrais, représentent de 70 à 80 % des émissions totales des exploitations en grandes cultures (Brochu, 2007). Par ailleurs, le prix des engrais azotés de synthèse a plus que doublé au cours des vingt dernières années et constitue un coût de production semblable à celui des semences pour le producteur (A. N'Dayegamiye, comm. pers.). Il est donc tout à fait pertinent de viser une meilleure utilisation des engrais azotés et de limiter leur application grâce à une maîtrise des bonnes pratiques agricoles.

Plusieurs études ont démontré que la culture de maïs ne répondait pas à des apports importants d'azote en postlevée, après des retours de prairies composées de légumineuses et même de graminées (Lawrence et al., 2008; Giroux et al., 2006, 2008; Bergeron, 2002). La destruction et la remise en culture d'une prairie entraînent une minéralisation importante de la matière organique du sol et des résidus de cultures accumulés dans le sol sous la prairie. Cette minéralisation entraîne ainsi une plus grande disponibilité de l'azote aux plantes cultivées l'année suivant la remise en culture des prairies et même l'année subséquente. Par ailleurs, en région à forte concentration d'élevages, les prairies reçoivent de nombreux épandages d'effluents qui augmentent aussi la quantité d'azote accumulée dans le sol et la végétation qui sera remise en disponibilité suite à la destruction de la prairie et à sa remise en culture (MacDonald et al., 2010). Dans ces conditions et avec les connaissances actuelles, les cultures de maïs-grain et de maïs-ensilage ne devraient pas répondre à des apports supplémentaires en engrais azotés au-delà du démarreur (50 kg N/ha), et même en deçà. Malgré ce fait, les producteurs agricoles de la région de Chaudière-Appalaches ne réduisent pas systématiquement les apports d'engrais en postlevée dans le maïs après un retour de prairie (Louis Robert, communication personnelle). Tout apport excédentaire d'engrais azoté dans les cultures se traduit par des émissions supplémentaires d'oxyde nitreux (N₂O), un puissant gaz à effet de serre qui contribue de façon non négligeable au bilan des émissions de GES de la province. La remise en culture d'une prairie accroît la présence de matières organiques et de carbone qui accentue le potentiel de dénitrification des engrais azotés apportés au sol. Une réduction de 100 kg N/ha en engrais azotés pourrait donc se traduire par des réductions substantielles d'émissions de N₂O, et même au-delà des 1 à 2 % généralement comptabilisées par le Groupe intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), puisque ces engrais sont plus à risque d'être dénitrifiés en présence de résidus organiques de la prairie.

D'autre part, les épandages d'engrais de ferme sont relativement fréquents sur les prairies en Chaudière-Appalaches et même au moment de leur enfouissement à l'automne ou au printemps suivant, avant les semis de la culture annuelle. L'azote apporté avec ces engrais de ferme s'accumule en réserve dans le sol de façon plus marquée en présence de prairie, par rapport aux cultures annuelles. La présence d'un important réseau racinaire en profondeur dans le sol facilite le captage de l'azote qui migre habituellement en profondeur dans le sol sous forme de nitrate, de même que le paillis de résidus végétaux à la surface du sol sous prairie constitue une zone d'accumulation de l'azote organique. Avec ces importantes réserves de N accumulées dans le sol, les cultures annuelles subséquentes bénéficient d'une importante réserve de N facilement minéralisable, permettant ainsi de réduire à un minimum les apports supplémentaires d'engrais azotés minéraux.

Objectifs

L'objectif du projet consistait à sensibiliser les producteurs agricoles et à démontrer par des essais à la ferme, qu'il y a moyen de réduire substantiellement les apports en engrais azotés de synthèse dans les cultures de maïs succédant une prairie et, ainsi, réduire les émissions de GES. Des essais de fertilisation avec des parcelles répétées ont été réalisés en champ chez les producteurs de la région de Chaudière-Appalaches afin de déterminer la quantité optimale d'engrais azotés à apporter en postlevée dans les cultures de maïs-grain ou de maïs-ensilage, suite à un retour de prairie. Ces essais de démonstration devaient confirmer la possibilité et la nécessité de réduire les apports d'engrais azotés par l'obtention de nouveaux renseignements permettant une meilleure prise de décision par les producteurs. Bien que réalisés dans la région de Chaudière-Appalaches, les résultats de ces essais seraient aisément applicables à l'ensemble du territoire québécois, où les mêmes conditions de retour de prairie et d'épandage d'engrais de ferme s'appliquent.

Matériel et méthodes

Plusieurs producteurs ont été sollicités aux printemps de 2012 et 2013 par les clubs-conseils de l'Association des conseillers et conseillères en agroenvironnement de Chaudière-Appalaches (ACAC) pour retenir 16 sites d'essais de fertilisation azotée. L'ACAC regroupe dix clubs. Les champs sélectionnés devaient être cultivés en maïs-grain ou en maïs-ensilage suite à un retour de prairie. Les champs ne devaient pas présenter de facteurs limitants, comme la compaction ou des besoins en chaux. Les producteurs devaient réaliser tous les travaux agricoles, sauf l'épandage d'engrais minéral en postlevée et la récolte des parcelles expérimentales.

Six sites ont finalement été retenus en 2012 (pour un potentiel de huit sites par année) et dix sites (dont deux abandonnés) en 2013. Les sites sélectionnés étaient en prairie depuis au moins trois ans sauf deux sites (site 4 et site 14) qui étaient en prairie depuis un an et deux ans respectivement. Aucune vieille prairie de plus de 10 ans n'a été utilisée dans ces essais.

En début d'essai, les sols ont été échantillonnés de 0 à 17 cm de profondeur pour établir leurs propriétés de base (granulométrie, pH, pH tampon, matière organique, P, K, Ca, Mg et Al extraits Mehlich 3) (Tableau 1). En général, les sols présentaient des conditions de fertilité acceptables pour la production de maïs-grain et du maïs-ensilage. Les teneurs en matière organique du sol étaient supérieures à 4,5 %, sauf sur le site 1 (Algerio) qui présentait une teneur en M.O. de 2,6 %. Quatre sites avaient des sols plus acides avec un pH inférieur à 6, mais seulement deux de ces sites nécessitaient des besoins en chaux supérieurs à 5 tonnes/ha.

Étant donné la pratique relativement répandue d'épandre des engrais de ferme sur les retours de prairie en Chaudière-Appalaches, les apports d'engrais de ferme étaient permis en présemis au printemps et à l'automne précédent. Par ailleurs, les producteurs pouvaient appliquer un engrais de démarrage (maximum de 50 kg N/ha) à condition de laisser trois bandes sans démarreur (schéma 1 de la Figure 1), autour desquelles cinq parcelles étaient installées pour l'application des différentes doses d'engrais azotés en postlevée.

Schéma 1 : Emplacement des 3 blocs de 5 parcelles avec démarreur

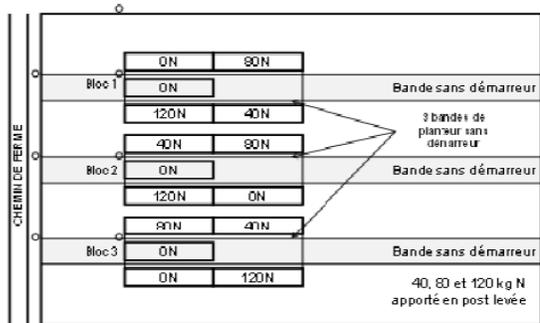


Schéma 2 : Emplacement des 3 blocs de 5 parcelles sans démarreur

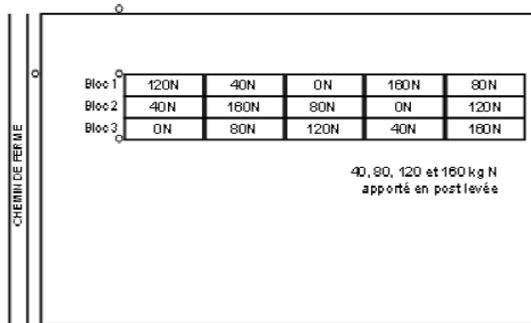


Figure 1 : Dispositifs expérimentaux pour le projet de retour de prairie.

Les apports totaux en azote provenant des engrais de ferme et des engrais de démarrage sont présentés au Tableau 2. L'apport total de N en provenance des engrais de ferme et des engrais de démarrage se chiffrait à moins de 100 kg N/ha sur deux sites, de 100 à 200 kg N/ha sur six sites et à plus de 200 kg N/ha sur les six autres sites. En présemis du maïs-grain et du maïs-ensilage, la valeur fertilisante en azote des engrais de ferme a été évaluée avec des coefficients d'efficacité pour la plupart variant de 0,30 à 0,60.

Avant les semis, les champs ont été inspectés pour délimiter trois zones (formant trois blocs de parcelles) dans lesquelles seraient disposées, après les semis, cinq parcelles recevant des doses croissantes de N. La délimitation des parcelles s'est faite à la fin du mois de juin, au moment de l'échantillonnage du sol pour l'analyse du nitrate en postlevée. Les parcelles avaient quatre rangs de large, sur 10 ou 12 m de long, et elles étaient disposées sur le terrain en fonction de la largeur du planteur à maïs utilisé.

Par la suite, les parcelles ont été fertilisées à des taux de 0, 40, 80 et 120 kg N/ha sur les quatre parcelles ayant reçu un engrais de démarrage au semis (schéma 1 de la Figure 1) ou à 0, 40, 80, 120 et 160 kg N/ha dans les parcelles sans démarreur (schéma 2 de la Figure 1). L'épandage d'engrais en postlevée a été réalisé sur deux rangs à la fois par une équipe de l'IRDA avec un équipement mobile fourni par le Réseau de lutte intégré de Bellechasse (Figure 2a). Aux stades 5-8 feuilles du maïs, le sol a été échantillonné (0-30 cm) dans chaque bloc dans les parcelles 0N (avec ou sans démarreur) pour déterminer les teneurs en nitrate en postlevée.



Figure 2 : Épandeur d'azote en postlevée à deux rangs (a) et batteuse stationnaire pour le battage du grain (b).

Tableau 1 : Propriétés physicochimiques des sols pour les sites d'essai sur retour de prairie.

No site	Année	pH eau	pH SMP	Mat. orga. %	P	K	Ca	Mg	Na	Al	Cu	Fe	Mn	Zn	P/Al	Argile	Limon	Sable	Classe texturale
										mg/kg									
1	2013	5.5	6.5	2.6	98	242	853	145	18	1045	6.0	370	153	3.8	9%	19	19	62	loam sableux grossier
2	2013	6.2	6.5	6.5	145	108	1844	115	21	1250	3.1	200	46	10.5	12%	16	27	57	loam sableux fin
3	2013	6.8	6.6	11.6	43	320	4618	143	49	1025	2.8	314	4	2.0	4%	50	46	4	argile limoneuse
4	2012	7.3	7.1	7.4	25	316	3786	199	25	844	3.8	282	11	2.2	3%	39	56	6	loam limono-argileux
5	2012	6.6	7.0	6.1	140	117	1983	132	16	786	1.7	247	62	4.8	18%	19	21	60	loam sableux fin
6	2013	6.1	6.7	4.5	120	72	1470	83	17	1189	1.8	264	19	3.4	10%	16	24	60	loam sableux fin
7	2012	6.1	6.8	4.7	50	195	1765	394	25	733	3.6	304	47	5.5	7%	35	46	19	loam limono-argileux
8	2013	7.0	7.0	7.6	111	187	3357	164	15	698	4.9	196	192	8.6	16%	18	21	61	loam sableux grossier
9	2013	5.7	6.1	8.7	54	100	1610	130	9	1589	3.0	144	9	6.6	3%	18	27	55	loam sableux fin
10	2012	6.6	6.8	7.2	60	95	1758	145	27	889	2.9	180	108	9.8	7%	17	30	53	loam sableux fin
11	2013	6.0	6.6	4.9	231	373	1818	137	29	1018	1.3	205	37	5.5	23%	23	17	60	loam sablo-argileux
12	2012	5.7	6.6	5.1	25	138	1337	61	12	927	1.1	138	67	2.0	3%	22	17	62	loam sablo-argileux
13	2012	5.0	5.6	8.1	31	250	736	123	55	1802	2.4	243	7	4.1	2%	56	38	6	argile
14	2013	6.5	6.9	6.5	96	183	1848	148	19	700	15.4	249	24	3.4	14%	14	21	65	loam sableux grossier

Tableau 2 : Apports de N total provenant des engrais de ferme et des engrais de démarrage sur les sites sur retour de prairie.

No site	Année	Culture	UTM	Date de semis	Démarrreur kg N/ha	Engrais de ferme automne		Engrais de ferme printemps			N total épandu kg N/ha
						kg N/ha	type	date	kg N/ha	type	
1	2013	maïs-ensilage	2300	7 mai 13	0	93	lisier bovin laitier	5-mai-13	96	lisier bovin laitier	189
2	2013	maïs-ensilage	2175	19 mai 13	0	0	aucun	4-mai-13	97	lisier bovin laitier	97
3	2013	maïs-ensilage	2400	19 mai 13	0	129	fumier bovin laitier	2-mai-13	128	lisier porc	257
4	2012	maïs-ensilage	2400	12 mai 12	0	18	purin bovin		0	aucun	18
5	2012	maïs-ensilage	2400	21 mai 12	25	27	fumier bovin	19-mai-12	100	lisier bovin	152
6	2013	maïs-ensilage	2400	4 mai 13	28	57	lisier bovin laitier	3-mai-13	65	lisier bovin laitier	150
7	2012	maïs-ensilage	2350	5 mai 12	0	203	lisier bovin		0	aucun	203
8	2013	maïs-ensilage	2350	7 mai 13	0	48	lisiers bovin+porc	4-mai-13	81	lisiers bovin+porc	129
9	2013	maïs-ensilage	2300	18 mai 13	0	90	lisiers bovin+porc	15-mai-13	143	lisiers bovin+porc	233
10	2012	maïs-ensilage	2175	20 mai 12	16	12	lisier bovin	14-mai-12	117	lisier porc	145
11	2013	maïs-grain	2325	24 mai 13	0	0	aucun	10-mai-13	278	fumier poulet	278
12	2012	maïs-grain	2350	18 mai 12	40	75	lisier bovin+porc	2-mai-12	150	lisier bovin+porc	265
13	2012	maïs-grain	2350	28 mai 12	0	163	lisier porc	21-mai-12	249	lisier porc	412
14	2013	maïs-grain	2250	4 mai 13	0	0	aucun	3-mai-13	146	lisier bovin laitier	146

En fin de saison, le maïs a été récolté manuellement sur deux rangs de 4 m de long situés au centre de chaque parcelle. Pour les sites en maïs-grain, seuls les épis ont été récoltés. Ils ont été battus avec une batteuse stationnaire (Figure 2b), puis le grain a été pesé à l'aide d'une balance portative, afin d'évaluer les rendements humides. La teneur en eau des grains a été évaluée après séchage à l'étuve à 70 °C, jusqu'à l'obtention d'une lecture stable. Pour les sites en maïs-ensilage, les épis, ainsi que les tiges, ont été récoltés séparément. Les épis ont été pesés entiers afin d'évaluer les rendements, puis passés à l'ensileuse pour évaluer leur teneur en eau. Les tiges ont d'abord été passées à l'ensileuse avant l'évaluation des rendements et des teneurs en eau.

Analyses statistiques

Les effets des traitements (dose de N, engrais de démarrage) sur les rendements en maïs ont été analysés sur chaque site séparément en analyse de variance (ANOVA) avec la procédure PROC MIXED du progiciel SAS (SAS Institute, 2003). Les effets fixes (traitements) ont été testés avec un test de Fisher afin de vérifier s'ils étaient significatifs (Prob. de $F < 0,10$). Dans tous les cas, l'analyse des résidus démontrait une distribution aléatoire, ce qui présupposait qu'il n'y avait pas de tendance induite par de mauvaises manipulations ou autre. Des régressions non linéaires ont été réalisées sur les sites d'essais présentant une réponse significative à l'apport d'engrais en vue de déterminer les doses optimales agronomiques et économiques de N à apporter. Pour le calcul des doses optimales économiques, le prix de l'engrais a été fixé à 1,74\$/kg tandis que les prix du maïs-grain et du maïs-ensilage ont été fixés respectivement à 235 et 114 \$/tm à 15 % d'humidité.

Données météo

Les données météorologiques de cinq stations climatiques opérées par Environnement Canada (Saint-Michel, Scott, Vallée-Jonction, Beauséjour, Lauzon) ont été compilées pour estimer les températures et précipitations moyennes enregistrées dans la région durant les deux saisons de croissance de 2012 et 2013 (Tableau 3). La saison de croissance de 2012 a été plus chaude et plus sèche que celle de 2013. Les mois de mai, juin, août et septembre étaient particulièrement plus chauds en 2012. Les mois de juillet et novembre de 2012 ont reçu beaucoup moins de précipitations qu'à la normale (< 50 mm). Le mois de mai 2013 a aussi été particulièrement pluvieux (200 mm), occasionnant bien des retards dans les semis au niveau de la région.

Tableau 3 : Températures et précipitations moyennes enregistrées durant les saisons de croissance de 2012 et 2013.

Mois	Température (°C)		Précipitations (mm)	
	2012	2013	2012	2013
Mai	13,2	12,3	132	200
Juin	17,5	15,1	176	128
Juillet	20,3	20,5	33	127
Août	20,0	18,1	99	123
Septembre.	14,2	13,4	95	100
Octobre	8,3	8,2	131	83
Novembre	-0,7	0,0	19	77
	13,3	12,5	685	839

Calcul des émissions de GES

Les réductions d'émissions de gaz à effet de serre (GES) ont été calculées essentiellement à partir de la réduction envisageable des doses d'engrais azoté apportées en postlevée dans le maïs suite à un retour de prairie. Les émissions de GES liées à l'usage des engrais minéraux proviennent de sources directes ou indirectes (Tableau 4). Les sources directes incluent la dénitrification (N₂O) causée par l'azote minéral apporté en postlevée ainsi que la consommation de carburant (CO₂) nécessaire pour réaliser l'application des engrais. Les sources indirectes incluent les émissions de N₂O suite à la dénitrification de l'azote qui s'est volatilisé sous forme ammoniacale ou lessivé sous forme de nitrate ainsi que les émissions de CO₂ associées à la fabrication de l'azote minéral. L'émission d'un kg de N₂O équivaut à 310 kg CO₂ (GIEC, 2006). Pour chaque kg de N épandu, près de 11 kg d'équivalent CO₂ (éq. CO₂) sont émis dans l'atmosphère.

Tableau 4 : Facteurs d'émissions utilisés pour estimer les émissions de gaz à effet de serre (GES)

Type de GES	Source	Facteurs d'émission		
		N ₂ O kg N ₂ O/ kg N	CO ₂ kg éq. CO ₂ /kg N	CO ₂ kg éq. CO ₂ /ha
N ₂ O	Directe (dénitrification)	0,017	5,27	
	Indirecte (dénitrification suite à la volatilisation de NH ₃ ou au lessivage de NO ₃)	0,0017	0,527	
CO ₂	Directe (consommation de carburant pour l'épandage de l'engrais minéral)	-		4,095
	Indirectes (fabrication de l'engrais)		3,7	

¹ : GIEC (2006). Lignes directrices 2006 du GIEC pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre. Volume 4 - Agriculture, foresterie et autres affectations des terres. Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). 73 p. (<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/french/vol4.html>)

² : La consommation de carburant diesel pour l'application des engrais correspond en moyenne à 1,5 l/ha (CRAAQ, AGDEX, 740/825 Coût d'utilisation et taux à forfait suggérés, Avril 2011) ; un litre de carburant diesel émet environ 2,73 kg CO₂ (http://www.cdaq.qc.ca/content/Documents/PAGES_carburant.pdf)

³ : Valeur pour l'urée (<http://www.basecarbone.fr/docs/generale/fr/index.htm?engrais.htm>)

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Effet de la dose de N sur les rendements en maïs

L'analyse de variance sur les rendements est présentée au Tableau 5. Sur les 14 sites suivis, l'apport de N sous forme d'engrais minéral suite à un retour de prairie a eu un effet significatif (Effet dose de N) sur un seul site (1) (Prob. F < 0,05) et une tendance sur le site 2 (Prob. F = 0,07). Un engrais azoté appliqué au démarrage sur les sites 5, 6, 10 et 12 n'a pas eu d'effet significatif sur les rendements, sauf pour une légère tendance sur le site 6 (Prof t = 0,12) et le site 12 (Prof t = 0,14). Le même contraste appliqué sur les autres sites (traitement sans engrais (0N) vs aux autres doses de N) a révélé un effet significatif des apports de N par rapport à la parcelle sans N (0N) sur 3 sites (1, 2, 14).

Tableau 5 : Effet de la dose de N et du démarreur sur le rendement du maïs à chaque site.

No site	Année	Partie récoltée	Démarreur	Rendement moyen à 15 % d'hum.	Effet dose de N	Effet 0 vs N	Coefficient de variation
			kg N/ha	tm/ha	Pr > F	Pr > t	%
1	2013	maïs-ensilage	0	13.5	0.004	0.0003	10
2	2013	maïs-ensilage	0	15.6	0.07	0.03	5
3	2013	maïs-ensilage	0	17.5	0.53	0.89	6
4	2012	maïs-ensilage	0	24.6	0.34	0.82	5
5	2012	maïs-ensilage	25	14.7	0.75	0.92	18
6	2013	maïs-ensilage	28	20.0	0.19	0.12	7
7	2012	maïs-ensilage	0	20.8	0.94	0.70	8
8	2013	maïs-ensilage	0	19.9	0.48	0.79	4
9	2013	maïs-ensilage	0	14.7	0.98	0.64	16
10	2012	maïs-ensilage	16	14.5	0.32	0.51	14
11	2013	maïs-grain	0	10.8	0.16	0.23	7
12	2012	maïs-grain	40	8.2	0.37	0.14	17
13	2012	maïs-grain	0	10.9	0.38	0.26	7
14	2013	maïs-grain	0	8.8	0.24	0.03	15

Le coefficient de variation (CV) indique le niveau de variabilité enregistré entre les parcelles sur chaque site qui ne sont pas imputables aux effets de la fertilisation azotée ou des blocs de parcelles. Un plus faible CV indique aussi une cohésion entre les observations et sous-tend que la méthodologie a été suivie avec rigueur : les résultats n'ont pas été influencés par de mauvaises manipulations, comme un manque de précision lors de l'application des engrais ou de la prise de rendements. De plus, un CV inférieur à 10 % est excellent dans un contexte agricole où la productivité peut varier beaucoup à l'intérieur du champ. La plupart des sites d'essais conduits par N'Dayegamiye et al. (2011) produisaient des CV inférieurs à 15 % (Nyiraneza et al., 2010). Ainsi, neuf sites dont les CV variaient de 4 à 10 % ont produit des rendements relativement stables, tandis que cinq sites ont présenté une variation plus grande, soit de 17 à 20 %. Ces cinq derniers sites présentaient d'ailleurs des rendements inférieurs en maïs-grain ou maïs-ensilage et la texture de surface était davantage sableuse, donc probablement plus prompte à créer des conditions de stress hydrique et des rendements plus variables, plus particulièrement en 2012.

La Figure 3 présente les courbes de réponse du maïs-ensilage et du maïs-grain à l'apport d'engrais minéral sur les quatorze sites d'essai. Les lignes pointillées indiquent une réponse non significative à la dose d'engrais (Prob. F > 0,05), tandis que les lignes pleines doubles indiquent une réponse significative de la dose de N (Prob. F < 0,05) et du contraste 0N vs dose de N (Prob. t < 0,05). Les lignes simples indiquent une seule réponse significative du contraste 0N vs dose de N (Prob. t < 0,05). À la vue de ces courbes, seul le site 1 présentait une réponse claire à la fertilisation azotée, où les trois parcelles sans azote (0N) produisent des rendements inférieurs en maïs-ensilage. Sur les sites 2 et 14, malgré un effet significatif du contraste 0N vs autres doses, certaines parcelles sans azote ont produit des rendements comparables aux autres doses et finalement l'effet de la dose n'est pas significatif au seuil de Prob. F = 0,05.

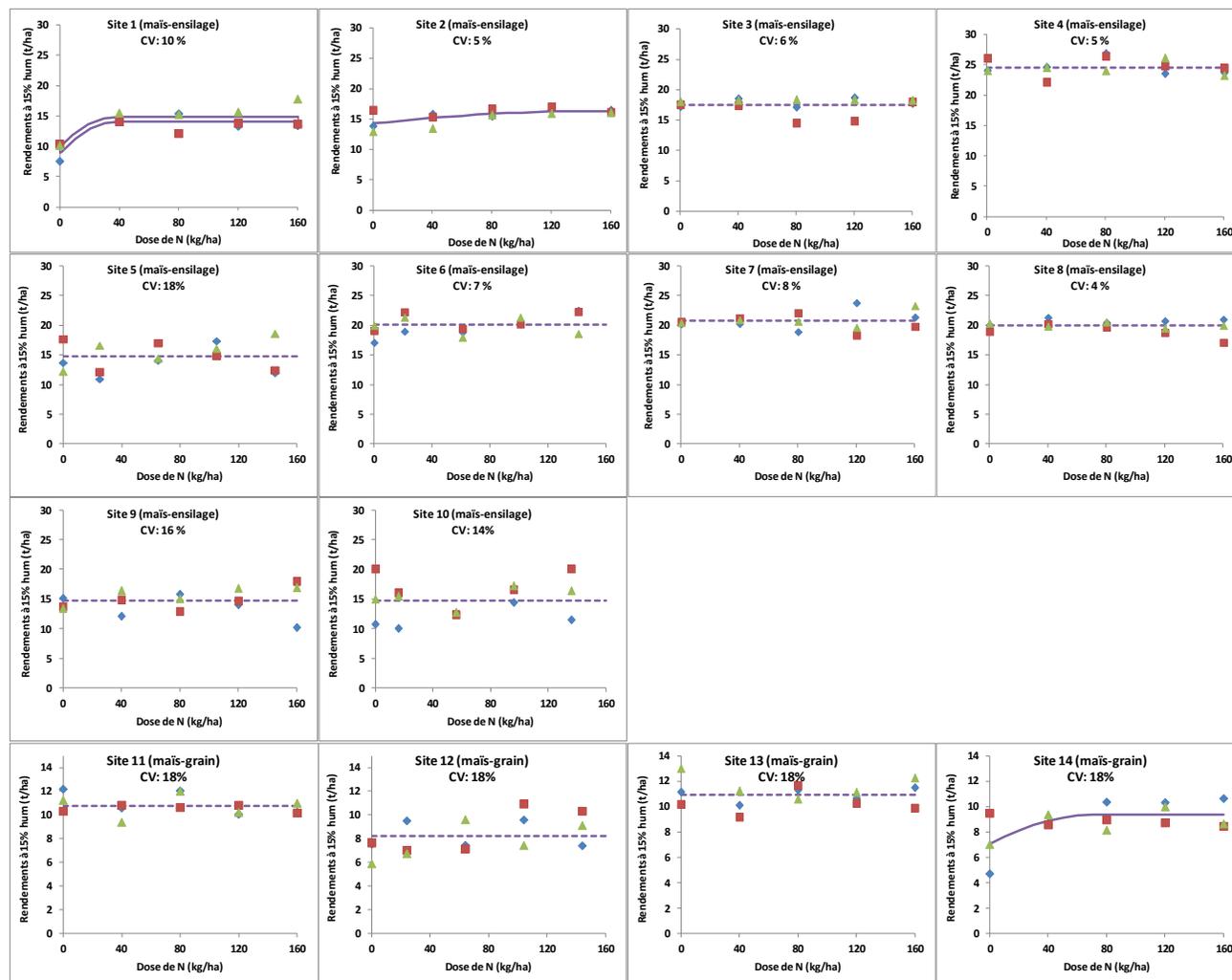


Figure 3 : Illustration de la réponse du maïs-ensilage (sites 1 à 10) et du maïs-grain (sites 11 à 14) à l'apport d'engrais minéral après un retour de prairie en Chaudière-Appalaches (2012 et 2013).

L'hypothèse selon laquelle il est possible de réduire considérablement les doses d'azote appliquées suite à un retour de prairie dans des cultures de maïs a donc été plusieurs fois vérifiée durant ces deux années d'essai. L'application d'azote en postlevée, y compris au démarreur n'aura produit des résultats significatifs qu'une fois sur quatorze essais. Sur le site 1, les doses optimales agronomiques et économiques ont été de 40 et 37 kg N/ha respectivement (Tableau 6). La dose optimale agronomique correspond à la dose de N à partir de laquelle le rendement maximal est atteint, tandis que la dose

économique optimale correspond à la dose à partir de laquelle il n'est plus rentable de rajouter de l'engrais azoté.

Sur le site 1, la plus faible teneur en matière organique du sol (2,6 %) pourrait expliquer la plus grande réponse du maïs (Tableau 6). Un tel taux de matière organique minéralise peu d'azote, sinon fournit peu de capacité à tamponner (immobiliser/minéraliser) les apports d'azote provenant des engrais de ferme et finalement fournir de l'azote à la culture. D'autre part, sur le site 1, les plus faibles teneurs en nitrate mesurées au laboratoire de l'IRDA en présemis et même en postlevée, inférieures à 20 mg N-NO₃/kg, laissaient présager des besoins supplémentaires en engrais azoté. En général, une teneur en nitrate supérieure à 20-25 mg N-NO₃/kg mesurée en postlevée dans le maïs indique une faible probabilité de réponse à l'azote (Cantin, 2007). Toutefois, aucune réponse à la fertilisation azotée n'a été observée sur les sites 9 et 10, où les plus faibles teneurs en nitrate (19 et 21 mg N-NO₃/kg, respectivement) étaient relativement proches de ce critère.

Tableau 6 : Liens entre les analyses de sol, le type d'engrais organique apporté au printemps et la réponse du maïs aux apports d'engrais N minéral sur chaque site.

No site	Année	Effet dose de N	Dose optimale agr./éco. de N	Engrais organique au printemps	Classe texturale	Teneur en M.O.	N-NO ₃ présemis Labo IRDA	N-NO ₃ postlevée Labo IRDA
			kg N/ha			%	mg/kg	mg/kg
1	2013	***	40/37	lisier bovin laitier	loam sableux grossier	2.6	11	16
2	2013	*		lisier bovin laitier	loam sableux fin	6.5	25	23
3	2013	ns		lisier porc	argile limoneuse	11.6	-	79
4	2012	ns		aucun	loam limono-argileux	7.4	29	40
5	2012	ns		lisier bovin	loam sableux fin	6.1	-	53
6	2013	ns		lisier bovin laitier	loam sableux fin	4.5	23	24
7	2012	ns		aucun	loam limono-argileux	4.7	24	26
8	2013	ns		lisiers bovin+porc	loam sableux grossier	7.6	19	42
9	2013	ns		lisiers bovin+porc	loam sableux fin	8.7	-	19
10	2012	ns		lisier porc	loam sableux fin	7.2	-	21
11	2013	ns		fumier poulet	loam sablo-argileux	4.9	-	64
12	2012	ns		lisier bovin+porc	loam sablo-argileux	5.1	-	35
13	2012	ns		lisier porc	argile	8.1	-	88
14	2013	*		lisier bovin laitier	loam sableux grossier	6.5	22	140

*** : effet très significatif; * : effet très peu significatif; ns : effet non significatif.

Un faible effet de la fertilisation minérale a aussi été noté sur deux autres sites (2 et 14) (Tableau 6), alors que les sols de ces deux sites présentaient des teneurs plus élevées en matière organique (6,5 % dans les deux cas). Sur le site 2, les teneurs en nitrate en postlevée étaient relativement faibles (23 mg N-NO₃/kg) avec une tendance à la baisse par rapport au printemps, ce qui indiquait une faible capacité de minéralisation du sol durant le printemps. Sur le site 14, les teneurs étaient relativement plus élevées (140 mg N/kg), mais aussi très variables d'un bloc de parcelles à l'autre, soit de 15, 80 et 243 mg N/kg. Ce dernier site présentait d'ailleurs une plus grande variabilité des rendements dans les parcelles sans engrais, donc une disponibilité variable de l'azote. Certains signes d'insuffisance en azote auraient donc pu être détectés sur ces deux sites avec le test de nitrate en postlevée. Outre ces teneurs en nitrate plus faibles, la pluviométrie plus abondante et le climat plus frais de 2013 par rapport à 2012, le type de lisier de bovin laitier appliqué au printemps et finalement la texture plus sableuse des sols pourraient expliquer la réponse partielle à la fertilisation azotée enregistrée sur ces deux sites. Dépendamment de la quantité de paille ou de litière retrouvée dans le lisier de bovin laitier, l'azote

pourrait avoir été temporairement immobilisé, en particulier au cours d'un printemps froid comme en 2013. Le rapport C/N du lisier est un bon indicateur de cette disponibilité, mais les lisiers n'ont pas été systématiquement analysés dans ce contexte. Pour ce qui est de la classe texturale, ces résultats iraient à l'inverse des résultats rapportés par Tremblay et al. (2012); la réponse semble plus probable et plus importante dans les loams sableux que dans les sols de textures plus fines.

En conclusion, le maïs a répondu à un apport d'azote supplémentaire (inférieur à 50 kg N/ha) après un retour de prairie seulement dans les sols dont la teneur en matière organique (MOS) est inférieure à 3 %. Sur les autres sols de la région dont la teneur en MOS était supérieure à 4,5 %, la réponse est pratiquement inexistante. Le climat plus froid et humide de 2013 par rapport à 2012, combiné à l'épandage de lisiers de bovin laitier plus immobilisateur en N, pourrait expliquer certaines faibles réponses enregistrées en 2013. Un suivi des teneurs en nitrate en postlevée dans le sol devrait permettre d'identifier les sites où une réponse à l'azote serait plus probable, soit lorsque les teneurs en nitrate sont inférieures à 20 mg N-NO₃/kg.

Analyse de nitrate en postlevée

Les analyses de nitrate en postlevée sont également présentées dans un rapport connexe (Gasser et al., 2014). La comparaison des valeurs obtenues au laboratoire de l'IRDA à celles obtenues par les clubs avec la trousse de terrain Nitracheck y est présentée. Ce rapport fait ressortir quelques éléments d'incertitude liés à la trousse Nitracheck, dont principalement des différences liées au conditionnement et au séchage des échantillons entre les labos de l'IRDA et ceux des clubs, mais aussi des réponses variables liées à l'efficacité des bandelettes utilisées avec la trousse, à la texture des sols, et finalement, une moins grande précision à des concentrations plus élevées de nitrate (> 50 mg/kg de N-NO₃) pour le Nitracheck. Néanmoins, en dessous du seuil critique de 20-25 mg/kg de N-NO₃, l'analyse du nitrate au Nitracheck devrait être en mesure d'identifier les sites où la réponse du maïs à l'engrais serait plus probable.

Par ailleurs, les teneurs en nitrate mesurées dans ces essais sont relativement élevées par rapport à d'autres études sur rotation de cultures annuelles, ce qui témoigne d'une disponibilité importante de l'azote dans ces sols. Par exemple, la concentration médiane des teneurs en nitrate mesurées dans les essais sur cultures annuelles de N'Dayegamiye et al. (2011) était de 9 mg N-NO₃ /kg alors qu'elle était de 35 mg/kg dans nos essais de Chaudière-Appalaches (Nyiraneza et al., 2010). Outre la minéralisation des résidus de prairies, les apports importants d'engrais de ferme réalisés à l'automne et au printemps sur certains des sites, expliqueraient ces teneurs élevées en nitrate et cette disponibilité élevée de l'azote (Tableau 2). Dans le contexte de la région, les prairies reçoivent des applications fréquentes d'engrais de ferme et encore davantage au moment de leur remise en culture. Certaines études rapportent à cet effet que le test de nitrate en postlevée serait moins fiable lorsque des apports récents d'engrais sous forme organiques ou d'urée ont été réalisés en présemis (Cantin, 2007). Une partie de l'azote risque de ne pas être nitrifiée à temps et détectée par le test de nitrate en postlevée. On risque ainsi de surévaluer les besoins en azote additionnels. Ceci n'a pas été le cas dans nos essais; la plupart des sites affichaient une teneur en nitrate supérieure à 20 mg/kg et ne répondaient pas à la fertilisation azotée en postlevée. Ce test serait en effet plus performant pour détecter la non-réponse aux engrais (Cantin, 2007).

Réduction des coûts de l'engrais et des émissions de GES

Les résultats mettent en évidence le potentiel de réduire les apports d'engrais azotés au démarreur et en postlevée et les émissions de gaz à effet de serre (GES) sur des retours de prairies fréquemment fertilisés avec des effluents d'élevage. Selon les observations recueillies auprès des conseillers de terrain, la pratique actuelle consiste à fournir jusqu'à 160 kg/ha de N disponible à la culture de maïs, alors que les recommandations dans la 2^e édition du Guide de référence en fertilisation sont de 120 à 170 kg N/ha selon la zone climatique et la texture du sol (CRAAQ, 2010). Sur un retour de prairie et un sol dont la teneur en MOS est supérieure à 5 %, on crédite jusqu'à 40 kg N/ha pour les contributions du précédent cultural et du sol (H. Moore, comm. pers.). Pour un apport de lisier de porc au printemps, on crédite généralement jusqu'à 50 kg N/ha. On peut donc recommander sur un retour de prairie, un minimum de 70 kg N/ha et jusqu'à 160 kg N/ha au semis et en postlevée, dépendamment si les effets des précédents culturaux sont tenus en compte et que des engrais organiques sont appliqués au printemps ou à l'automne précédent.

Pour les besoins de calcul de réductions des coûts de l'engrais et des émissions de GES, la pratique actuelle a été synthétisée en deux options, soit un apport d'engrais minéral de 50 kg N/ha au semis, complémenté par des apports en postlevée de 50 ou 100 kg N/ha supplémentaire, dépendamment du crédit associé aux épandages d'engrais organiques (Tableau 7). Suite aux résultats de ce projet, deux scénarios de réduction sont envisagés, soit le scénario 1, plus conservateur et qui n'a été observé qu'une fois sur 14, qui maintient l'ajout d'un engrais (50 kg N/ha) au semis ou en postlevée dépendamment des besoins observés, et le scénario 2 qui exclut l'ajout d'un engrais minéral au semis ou en postlevée, qui répondrait 13 fois sur 14 au besoin de la culture.

Tableau 7 : Comparaison entre le niveau d'utilisation actuelle des engrais minéraux azotés pour la production de maïs grain et deux scénarios de réduction des engrais minéraux.

	Apport d'engrais organique	Engrais N minéral au semis	Engrais N minéral en postlevée	Engrais N minéral Total
-----kg N/ha-----				
Pratique actuelle 1	Non	50	100	150
Pratique actuelle 2	Oui	50	50	100
Scénario de réduction 1	-	50	-	50
Scénario de réduction 2	-	-	-	0

Selon les pratiques actuelles et les scénarios de réduction envisagés, il y aurait moyen de réduire de 50 à 150 kg N/ha les apports en engrais minéraux azotés dans le maïs sur retour de prairie, dans les conditions de production de la région de Chaudière-Appalaches. Par exemple, en passant de la pratique actuelle 2 au scénario de réduction 1, il y a moyen d'économiser 50 kg N/ha, tandis qu'en passant de la pratique 1 au scénario 2, il y a moyen de réduire jusqu'à 150 kg N/ha les apports en engrais minéraux dans le maïs sur retour de prairie, sans affecter les rendements.

Le Tableau 8 rapporte les valeurs monétaires et les émissions de gaz à effet de serre (GES) attribuées aux pratiques actuelles d'épandage d'engrais minéraux et aux scénarios de réduction envisagés. Dans un premier temps, il importe de mentionner que les émissions directes de N₂O (dénitrification de l'azote minéral épandu) et les émissions indirectes de CO₂ (fabrication de l'engrais azoté de synthèse) représentent les deux principales sources de GES.

Tableau 8 : Réductions potentielles des émissions de gaz à effet de serre (GES) en fonction de deux scénarios de réduction des engrais minéraux dans le maïs grain.

	Apport en engrais organique	Engrais N		Émissions de GES				Totales
		kg N/ha	\$/ha	Directes		Indirectes		
				N ₂ O	CO ₂	N ₂ O	CO ₂	
						kg éq. CO ₂ /ha		
Pratique actuelle 1	Non	150	261	791	206	79	555	1630
Pratique actuelle 2	Oui	100	174	527	137	53	370	1087
Scénario de réduction 1	-	50	87	264	69	26	185	543
Scénario de réduction 2	-	0	0	0	0	0	0	0

Une réduction de 50 à 150 kg N/ha en apport d'engrais minéraux se traduirait par des réductions de coûts de 87 à 261 \$/ha et des réductions d'émissions de GES allant de 543 à 1630 kg éq. CO₂/ha, soit des réductions non négligeables à la fois en termes économiques et environnementaux. En termes économiques, par rapport à une marge de profit de l'ordre de 300 \$/ha, une réduction de coût de 261 \$/ha équivaudrait à pratiquement doubler les profits réalisés. En termes environnementaux, une réduction de 1630 kg éq. CO₂/ha appliquée sur 20 000 ha de maïs cultivé après un retour de prairie à l'échelle du Québec équivaudrait à 32 600 tm éq. CO₂, soit 0,5 % des 6,6 Mt éq. CO₂ d'émissions reliées au secteur agricole québécois (MDDEFP, 2013). Le même raisonnement appliqué en termes économiques sur 20 000 ha représente des pertes 5,2 millions \$ qui sortent actuellement des poches des producteurs, sans entraîner aucun gain de rendement, mais plutôt une hausse des impacts environnementaux.

Dans le calcul des émissions de GES, il faut toutefois souligner qu'aucune émission n'a été calculée ni pour les apports en engrais organiques, ni pour la remise en culture du sol après le retour de prairie. En Chaudière-Appalaches, les prairies reçoivent fréquemment des apports en engrais de ferme, dont en majorité des lisiers de porc et de bovin laitier. Ces engrais ne sont pas incorporés au sol sur la prairie et subissent des pertes importantes par volatilisation d'ammoniac qui contribuent aux émissions indirectes de N₂O. Comparativement à l'engrais minéral, l'épandage de lisier de porc sur une prairie peut émettre jusqu'à six fois plus de N-NH₃ (émissions indirectes) et la dénitrification (émissions directes) serait également près du double (Chantigny et al., 2007). La destruction d'une vieille prairie fertilisée ou non avec du lisier de porc en Chaudière-Appalaches a conduit à des émissions de l'ordre de 9 à 30 kg de N₂O/ha soit près de 2800 à 9300 kg éq. CO₂/ha (McDonald et al., 2010). Ces émissions directes de N₂O sont près de 2 à 6 fois supérieures à celles totales engendrées par la production et l'épandage de 150 kg N/ha en engrais minéral. Soulignons toutefois que les émissions les plus importantes ont été mesurées sous une prairie brûlée à l'herbicide et non labourée, dans des conditions de sol mal drainé lors d'une année pluvieuse. Par ailleurs, aucune culture n'a été établie au printemps pour capter l'azote minéralisé suite à la décomposition de la prairie, conduisant à des concentrations importantes de nitrate dans le sol en condition anaérobie. Le choix d'une culture exigeante en N comme le maïs après le retour d'une prairie est donc tout à fait approprié pour capter le nitrate en excès et réduire les émissions de N₂O. Par contre, vu le très peu de réponse à l'apport supplémentaire en engrais minéral azoté dans les conditions de production de Chaudière-Appalaches, cet apport est tout à fait contre-indiqué pour réduire les risques d'émissions de GES.

CONCLUSION

Même pour des cultures plus exigeantes en azote comme le maïs, les probabilités de réponses à un apport supplémentaire d'engrais minéral azoté sont pratiquement inexistantes après un retour de prairie en Chaudière-Appalaches. Les sols ont des taux relativement élevés en matière organique et les prairies reçoivent fréquemment des apports d'engrais de ferme. Sur les quatorze sites d'essai menés dans la région en 2012 et 2013, un site seul a démontré une réponse claire à un apport supplémentaire d'engrais minéral en 2013, à raison de 40 kg N/ha. La teneur en matière organique du sol de ce site était relativement plus faible (2,6 %) que les autres sites (> 4,5 %) et l'analyse de nitrate en postlevée du maïs (< 20 mg N-NO₃/kg) indiquait aussi des besoins supplémentaires en N. Un apport de 40 kg N/ha aurait comblé ces besoins en N.

Aucune réponse n'a été observée en 2012, une année particulièrement chaude et sans excès de précipitations qui aura à la fois favorisé des rendements très acceptables sur la plupart des sites et favorisé la contribution du sol à la fertilisation des cultures, ce qui est corroboré par des teneurs relativement élevées de nitrate mesurées en postlevée dans le sol au mois de juin. Le climat plus froid et pluvieux de 2013 par rapport à 2012, combiné à l'épandage de lisiers de bovin laitier plus immobilisateur en N, pourrait expliquer certaines faibles réponses enregistrées en 2013. Un suivi des teneurs en nitrate en postlevée devrait permettre d'identifier les sites dont la réponse à l'azote serait plus probable, lorsque les teneurs en nitrate sont inférieures à 20 N-NO₃/kg.

En conclusion, le maïs a répondu à un apport d'azote supplémentaire (inférieur à 50 kg N/ha) après un retour de prairie seulement dans les sols dont la teneur en matière organique (MOS) est inférieure à 3 %. Sur les autres sols de la région dont la teneur en MOS était supérieure à 4,5 %, la réponse était pratiquement inexistante.

Suite à ces résultats, des scénarios de réduction d'apport en engrais minéraux ont été envisagés par rapport aux pratiques actuelles. En limitant l'apport d'engrais au semis à moins de 50 kg N/ha ou même sans apport de N, il y aurait moyen de réduire de 50 à 150 kg N/ha les apports en engrais minéraux azotés dans le maïs sur retour de prairie, sans affecter les rendements. Ces réductions de consommation d'engrais se traduiraient par des réductions de coûts de 87 à 261 \$/ha et des réductions d'émissions de GES allant de 543 à 1630 kg éq. CO₂/ha, se traduisant par des gains économiques et environnementaux non négligeables.

POINT DE CONTACT POUR INFORMATIONS



Marc-Olivier Gasser, agr. Ph.D.

Chercheur

Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA)

2700, rue Einstein

Québec, Québec G1P 3W8

Tél.: (418) 643.2380 poste 650

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

Site internet: www.irda.qc.ca

RÉFÉRENCES

- Bergeron, I. 2002. Sur un retour de prairie, le maïs a besoin de peu d'azote. 4 p. [En ligne] : <http://www.agrireseau.qc.ca/bovinslaitiers/Documents/sur%20un%20retour.pdf>
- Brochu, J.-L., 2007. Synthèse 2006 des bilans PLANETE. Étude réalisée pour le compte de l'ADEME par SOLAGRO. 30 p. [En ligne] : [http://www.solagro.org/site/im_user/0286_\\$014planete2006_synth30pages.pdf](http://www.solagro.org/site/im_user/0286_$014planete2006_synth30pages.pdf).
- Cantin, J. 2007. Les tests de nitrate de sol afin d'ajuster la fertilisation azotée du maïs. Colloque sur l'azote organisé conjointement par le CRAAQ et l'OAQ à Drummondville le 28 mars 2007. http://www.agrireseau.qc.ca/agroenvironnement/documents/Cantin_%20J_resume_PPT.pdf.
- CRAAQ. 2010. Guide de référence en fertilisation (2^e édition). Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec. Québec. 473 p.
- Chantigny, M.H., D.A. Angers, P. Rochette, G. Bélanger, D. Massé, et D. Côté. 2007. Gaseous nitrogen emissions and forage nitrogen uptake on soils fertilized with raw and treated swine manure. *J. Environ. Qual.* 36:1864-1872.
- Gasser M.O., 2014. Comparaison des concentrations de nitrate dosées au nitrachek et au laboratoire dans les sols échantillonnés en postlevée dans le maïs. Rapport de recherche présenté au MAPAQ. Projet Prime-Vert, sous volet 8.4. 9 p.
- Giroux, M. et M. Lemieux, 2006. Comparaison de différentes méthodes d'évaluation de la fertilité azotée des sols et détermination de la dose N optimale du maïs ensilage. *Agrosol* : 17 : 39-50.
- Lawrence, J.R., Q.M. Ketterings and J.H. Cherney, 2008. Effect of nitrogen application on yield and quality of first year corn. *Agron. J.* 100: 73-79.
- MacDonald, J.D., P. Rochette, M.H. Chantigny, D.A. Angers, I. Royer and M.O. Gasser, 2010. Ploughing a poorly-drained grassland reduced N₂O emissions compared to chemical fallow. *Soil and tillage Research.* 111: 123-132.
- MDDEFP (2013), Inventaire québécois des émissions de gaz à effet de serre en 2010 et leur évolution depuis 1990, Québec, ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs, Direction des politiques de la qualité de l'atmosphère, 20 p.
- N'Dayegamiye, A., M.-O. Gasser, M. Grenier, M. Giroux, C. Landry, S. Guertin et G. Tremblay. 2011. Choix d'indicateurs efficaces pour prédire la fertilisation azotée des sols. Rapport de recherche présenté au CDAQ. Projet No 6177. 28 p. <http://www.irda.qc.ca/documents/Results/240.pdf>.
- Nyiraneza, J., A. N'Dayegamiye, M.-O. Gasser, M. Giroux, M. Grenier, C. Landry and S. Guertin, 2010. Soil and crop parameters related to corn nitrogen response in Eastern Canada. *Agron. J.* 102: 1478-1490.
- SAS Institute, 2003. SAS User's Guide. Statistics. Version 9.2. SAS Inst., Carry, NC.
- Tremblay, N., Y.M. Bouroubi, C. Bélec, R.W. Mullen, N.R. Kitchen, W.E. Thomason, S. Ebelhar, D.B. Mengel, W.R. Raun, D.D. Francis, E.D. Vories et I.Ortiz-Monasterio. 2012. Corn response to nitrogen is influenced by soil texture and weather. *Agron. J.* 104:1658-1671.