

PROGRAMME PRIME-VERT
**Sous-volet 8.4 - Évaluation, information et sensibilisation en matière de technologies
et des pratiques agricoles de réduction des émissions de gaz à effet de serre**

**Réduire les apports en azote et les émissions de GES
en incorporant rapidement les lisiers en présemis des cultures annuelles**

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 ⁵ 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 de l'auteur ou des auteurs et n'engagent aucunement le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec.

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.

Le rapport peut être cité comme suit :

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. 23 p. + annexe.





FAITS SAILLANTS

Les modalités liées aux épandages de lisiers représentent des éléments critiques de gestion, tant pour l'efficacité agronomique que pour les risques environnementaux. L'incorporation rapide des fumiers, simultanément ou dans les minutes qui suivent l'épandage, réduit les émissions de NH_3 et augmente l'efficacité fertilisante de l'azote des lisiers. La réduction de l'utilisation des engrais minéraux azotés permet de réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES) associés à la dénitrification ainsi qu'à la fabrication et l'application des engrais minéraux. Le projet visait à démontrer qu'il était possible de réduire les doses d'azote minéral apportées en postlevée dans les cultures de maïs-grain lorsque les lisiers sont incorporés rapidement (< 1 heure). Pour ce faire, huit sites d'essais ont été mis en place (2012 et 2013) afin d'évaluer l'effet de l'incorporation rapide sur les rendements en grains selon trois doses d'azote apportées en postlevée (0, 40 et 80 kg N/ha). Les résultats ont démontré que pour les huit sites d'essai, les rendements en maïs n'ont pas augmenté avec l'apport d'azote minéral en postlevée. Seulement un site a produit des rendements supérieurs avec l'incorporation rapide. D'après ces résultats, il semble difficile de démontrer que l'incorporation rapide des lisiers augmente l'efficacité de son azote, du moins en conditions de production de Chaudière-Appalaches.

Les teneurs élevées en matière organique des sols ($>5\%$) et les apports fréquents d'engrais organiques ont significativement contribué à la fertilisation du maïs, ce qui peut expliquer l'absence de réponse du maïs à l'ajout d'engrais azoté en postlevée, que le lisier épandu au printemps soit incorporé rapidement ou non. La majorité des sites (sept) avait des teneurs en N-NO_3 en postlevée supérieures au seuil critique de 20-25 mg $\text{N-NO}_3/\text{kg}$ à partir duquel la réponse du maïs à l'engrais azoté serait limitée. En revanche, le manque de réponse à l'azote en postlevée semble démontrer que le bilan de GES pourrait être amélioré. Il y a un potentiel de réduire les émissions de GES de presque 1 tonne éq. CO_2/ha en éliminant la dose d'azote en postlevée. De plus, parmi les quatre sites n'ayant pas reçu de démarreur, aucun n'a répondu à l'apport d'azote minéral en postlevée. Ces résultats suggèrent que, dans certains champs, la dose d'azote au démarreur peut également être éliminée, sans réduction significative des rendements. Par conséquent, il devient primordial de comptabiliser l'arrière effet des engrais organiques dans la régie de fertilisation. En plus de réduire les émissions de GES et les pertes d'azote par lessivage, la réduction ou l'élimination des engrais minéraux azotés appliqués en postlevée permettrait aux entreprises agricoles de réduire leur coût de production ($\sim 100\$/\text{ha}$). Une fiche technique a été produite pour transférer ces résultats aux conseillers et aux producteurs.



TABLE DES MATIÈRES

Avertissement	3
Remerciement	3
Faits saillants	2
Table des matières	3
Liste des tableaux	3
Liste des figures	4
1. Objectifs	4
2. Aperçu de la méthodologie	5
2.1. Dispositifs au champ	5
2.2. Analyses statistiques.....	10
2.3. Calcul des émissions de GES et du coût des engrais.....	11
3. Résultats	12
3.1. Les rendements en maïs-grain et la teneur en nitrates.....	12
3.2. Les émissions de GES	17
4. Applications possibles	19
5. Références pour information	19
6. Références	20
Annexe 1	22

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.	Propriétés physicochimiques des sols pour les sites (valeurs moyennes pour les trois blocs)	7
Tableau 2.	Dates des principales activités réalisées sur les sites	7
Tableau 3.	Apports de N en provenance des engrais de ferme (automne et printemps) et des engrais de démarrage sur les sites avec incorporation rapide des lisiers (2012 et 2013).....	8
Tableau 4.	Facteurs d'émissions utilisés pour estimer les émissions de gaz à effet de serre (GES).....	12
Tableau 5.	Effets de l'incorporation rapide du lisier, de la dose de N et de leur interaction sur les rendements de maïs et analyses de nitrate en postlevée pour chaque site	13
Tableau 6.	Facteurs qui exercent potentiellement une influence sur la réponse du maïs à l'ajout d'engrais azoté minéral en postlevée.....	15
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.....	17
Tableau 8.	Réductions potentielles des émissions de GES en fonction de deux scénarios de réduction des engrais minéraux dans le maïs-grain.....	18



LISTE DES FIGURES

Figure 1.	Dispositif expérimental.....	6
Figure 2.	Herse Turbo-till pour réaliser l'incorporation rapide (photo : <i>Great Plains</i>)	8
Figure 3.	Équipement d'incorporation rapide sur la citerne (photo : Agrinova).....	8
Figure 4.	Utilisation d'une déchaumeuse pour l'incorporation rapide des lisiers (photo : Catherine Bossé)	9
Figure 5.	Utilisation d'un rotoculteur pour l'incorporation rapide des lisiers (photo : Catherine Bossé)	9
Figure 6.	Épandeur d'azote en postlevée à deux rangs (Photo : IRDA)	9
Figure 7.	Évaluation du rendement en grains avec une batteuse stationnaire (Photo : IRDA)	10
Figure 8.	Rendements en maïs-grain (à 15 % d'humidité relative) pour les huit sites en fonction des doses d'azote minéral apportées en postlevée et de l'incorporation rapide ou non des lisiers	14



1. OBJECTIFS

L'objectif du projet consiste à démontrer qu'il y a moyen de réduire les doses d'engrais azotés apportés en postlevée des cultures annuelles, lorsque des lisiers sont incorporés rapidement en présemis. Les objectifs spécifiques sont de :

- démontrer aux producteurs l'effet positif de l'incorporation rapide des lisiers sur la courbe de réponse à l'azote de cultures annuelles permettant de réduire les apports d'engrais azotés en postlevée, les coûts de production et les émissions de GES;
- promouvoir les techniques d'incorporation rapide des effluents d'élevage en labour conventionnel et en semis direct afin de faciliter leur adoption par les producteurs.

L'incorporation rapide des lisiers répond non seulement aux objectifs du programme en termes de GES, mais s'insère également dans une logique de développement durable en atténuant les impacts potentiellement négatifs des épandages sur la qualité de l'eau et sur la réduction des odeurs.

2. APERÇU DE LA MÉTHODOLOGIE

2.1. Dispositifs au champ

Les conseillers de l'ACAC (Association des conseillers et conseillères en agroenvironnement de Chaudière-Appalaches) ont sollicité leurs producteurs et ont proposé quatre sites en 2012 et trois sites en 2013. Un site a également été retenu à la station expérimentale de Saint-Lambert (2012) pour comparer des facteurs et des traitements additionnels, soit ceux d'appliquer ou non du lisier, de travailler le sol avant et après l'épandage (1 heure ou 24 heures après) ou de ne pas travailler le sol. Les champs sélectionnés devaient être cultivés en maïs-grain ou en maïs ensilage, suite à un épandage de lisiers en présemis. 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.

Afin de démontrer l'augmentation possible de la valeur fertilisante des engrais de ferme, suite à leur incorporation rapide, un dispositif constitué de deux facteurs en tiroir avec trois répétitions a été installé dans chaque champ (figure 1) :

- Facteur 1 : lisier incorporé rapidement (< 1 h) ou tardivement (> 48 h) après l'épandage;
- Facteur 2 : trois doses d'engrais azoté (minéral) apportées en postlevée (0, 40 et 80 kg N/ha).



Schéma 1 : Emplacement des 3 blocs de parcelles

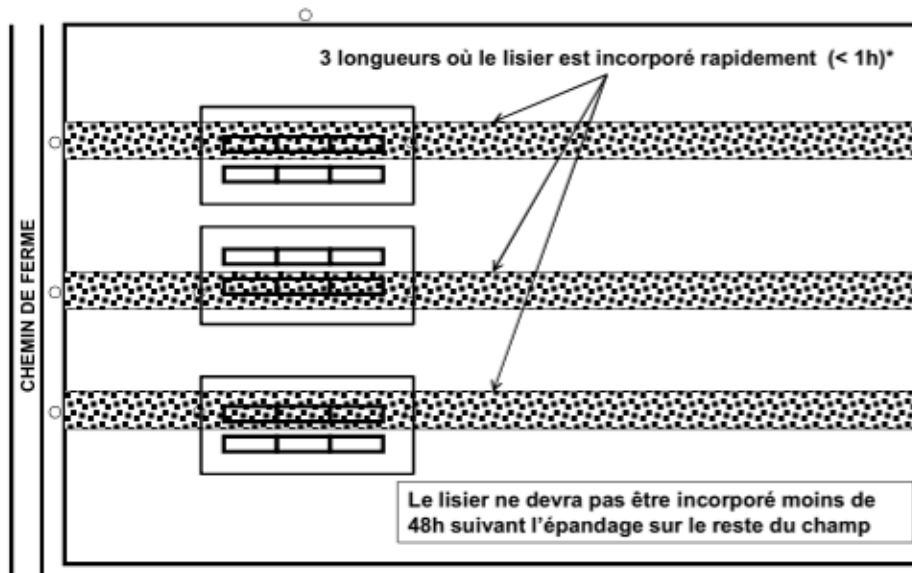


Schéma 2 : Les 6 parcelles fertilisées en post levée à l'intérieur d'un bloc de répétition

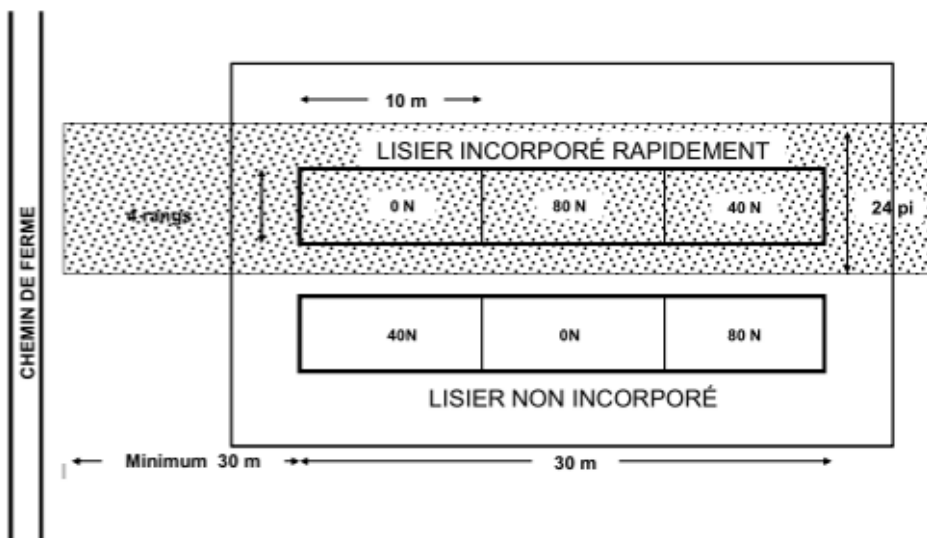


Figure 1. Dispositif expérimental

En début de saison, les champs ont été inspectés avant les semis pour délimiter trois blocs de parcelles dans lesquelles ont été disposés trois parcelles d'au moins 10 m de long et quatre rangs de large. Les sols des sites ont été échantillonnés au printemps 2012 et 2013, de 0 à 17 cm de profondeur, pour établir les propriétés de base (granulométrie, pH, pH tampon, matière organique, K, Ca, Mg, Al, Fe, Zn, Cu, Mn et extraits Mehlich 3).



Le tableau 1 présente les principales propriétés physicochimiques des sols alors que les dates des principales activités réalisées sur les sites figurent au tableau 2. Tous les sites présentaient des sols avec des teneurs relativement élevées de matière organique (MOS > 5 %), sauf le site 8 avec une teneur à 2,6 %. Le site 3 présentait également une teneur très élevée en MOS en raison de la présence de zones de sol organique. Une application de lisiers, le 21 mai 2012, explique les teneurs élevées en N-NH₄ analysées dans le sol sur le site 4, échantillonné deux jours après l'épandage. Les autres sites ont été échantillonnés avant les épandages, soit avant le 18 mai 2012. Toutefois, le sol sur le site 3 présentait déjà des teneurs élevées en N-NO₃. En 2013, tous les sols ont été échantillonnés avant l'application de lisiers.

Tableau 1. Propriétés physicochimiques des sols pour les sites (valeurs moyennes pour les trois blocs)

Site	pH	pH	M.O.	N-NH ₄	N-NO ₃	P	K	Ca	Mg	P/Al	Argile	Limon	Sable
	eau	SMP	%	KCl 1M		Mehlich 3					%		
				mg/kg									
1 (2012)	5.9	6.5	7.1	11	14	53	208	2247	231	6	50	42	9
2 (2013)	6,5	6,8	6,1	3	9	65	84	1860	47	6	15	33	52
3 (2012)	6.0	6.2	20.3	8	27	58	117	3526	129	6	28	41	31
4 (2012)	5.3	6.1	6.6	90	44	51	188	825	164	3	37	19	44
5 (2013)	6,3	6,6	7,0	2	20	157	249	1739	146	13	14	20	66
6 (2013)	6,6	6,5	10,1	3	18	71	451	3721	133	6	28	29	43
7 (2012)	6.9	7.0	5.9	10	12	158	63	2346	94	18	22	25	53
8 (2012)*	5.9	--	2.6	--	10	28	101	829	125	3	28	48	24

* Ferme expérimentale de l'IRDA à Saint-Lambert-de-Lauzon

Tableau 2. Dates des principales activités réalisées sur les sites

Site	UTM	Date				
		Échantillonnage du sol	Application de lisiers	Semis	N postlevée	Récolte
1 (2012)	2100	18 mai	21 mai	25 mai	21 juin	19 octobre
2 (2013)	2275	2 mai	14 mai	19 mai	5 juillet	30 octobre
3 (2012)	2200	8 mai	14 mai	25 mai	29 juin	9 octobre
4 (2012)	2350	23 mai*	21 mai	28 mai	4 juillet	30 octobre
5 (2013)	2400	29 avril	4 mai	5 mai	2 juillet	8 octobre
6 (2013)	2475	30 avril	7 mai	8 mai	3 juillet	29 octobre
7 (2012)	2350	17 mai	18 mai	21 mai	22 juin	22 octobre
8 (2012)	2250	nd	31 mai	6 juin	5 juillet	7 novembre

*Le sol a été échantillonné après l'application de lisiers.

Les apports totaux en azote en provenance des engrais de ferme et des engrais de démarrage sont présentés au tableau 3. S'il y a eu ajout d'un démarreur, la dose ne devait pas dépasser 50 kg N/ha. Les doses de N apportées avec les lisiers en présemis variaient de 68 à 391 kg N/ha. La dose massive de N apportée sur le site de l'IRDA (site 8) résulte d'un lisier peu dilué provenant d'une préfosse. Le lisier devait également être incorporé rapidement (en moins d'une heure) par le producteur sur les trois zones d'incorporation rapide. Un outil adapté pour le travail réduit (herse *Turbo-Till*) a été utilisé pour incorporer le lisier à la



surface des sols (figure 2). Cette herse a été utilisée sur les sites 1 et 8. Sur les autres sites, différents équipements disponibles chez les entreprises partenaires ont été utilisés pour l'incorporation rapide (figures 3 à 5). Sur le reste du champ, le lisier n'a pas été incorporé avant 48 heures.

Tableau 3. Apports de N en provenance des engrais de ferme (automne et printemps) et des engrais de démarrage sur les sites avec incorporation rapide des lisiers (2012 et 2013)

Site	Engrais de ferme*		N démarreur	N total
	Automne	Printemps		
	kg N/ha			
1	0	172	31	203
2	0	141	27	168
3	0	145	26	171
4	163	249	0	412
5	0	130	0	130
6	0	259	0	259
7	0	68	36	104
8 (IRDA)	0	391	0	391

* Tous les engrais de ferme étaient des lisiers de porcs à l'exception du site 5 qui a reçu du lisier de bovins laitiers.



Figure 2. Herse Turbo-till pour réaliser l'incorporation rapide (photo : Great Plains)



Figure 3. Équipement d'incorporation rapide sur la citerne (photo : Agrinova)



Figure 4. Utilisation d'une déchaumeuse pour l'incorporation rapide des lisiers
(photo : Catherine Bossé)



Figure 5. Utilisation d'un rotoculteur pour l'incorporation rapide des lisiers
(photo : Catherine Bossé)

Les limites des grandes zones de parcelles ont été identifiées lors de l'incorporation des lisiers avant les semis, tandis que les sous-parcelles de dose de N ont été délimitées, à la fin du mois de juin, au moment de l'échantillonnage du sol pour l'analyse du nitrate dans le sol en postlevée du maïs. L'apport d'azote minéral a été réalisé au stade 5 à 6 feuilles par une équipe de l'IRDA avec un équipement mobile fourni par le Réseau de lutte intégrée de Bellechasse (figure 6).



Figure 6. Épandeur d'azote en postlevée à deux rangs (Photo : IRDA)



En fin de saison, le maïs a été récolté manuellement sur deux rangées de 4 m de long situées au centre de chaque parcelle. Puisque tous les sites étaient en maïs-grain, seuls les épis ont été récoltés. Ils ont été battus avec une batteuse stationnaire (Figure 7), 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.



Figure 7. Évaluation du rendement en grains avec une batteuse stationnaire (Photo : IRDA)

En 2012, un site a été abandonné à la récolte, en raison de mauvaises conditions de production liées au type de sol susceptible à la sécheresse et de la présence de ravageurs. En 2013, un site a été abandonné au moment de la récolte en raison du niveau d'humidité du grain trop élevé qui a fait pourrir les épis. Un autre site a été abandonné, en 2013, en raison de la levée inégale du maïs qui aurait rendu impossible les comparaisons entre les traitements. Finalement, un autre site a été abandonné en 2013, car le producteur a procédé à la récolte avant l'évaluation des rendements. Pour ces raisons, seulement les résultats de huit essais sont rapportés comparativement aux douze essais initialement prévus dans le projet.

2.2. Analyses statistiques

Les effets des traitements (dose de N, engrais de démarrage, incorporation des lisiers et interactions) 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 présuait qu'il n'y avait pas de tendance induite par de mauvaises manipulations ou autre.



2.3. Calcul des émissions de GES et du coût des engrais

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 l'incorporation rapide des lisiers. Les émissions de GES liées à l'usage des engrais minéraux proviennent de sources directes ou indirectes (Tableau 4). Le calcul de ces émissions est sauf indication contraire réalisé sur les mêmes prémisses que dans le Rapport d'inventaire national des sources et puits de GES (Environnement Canada, 2013). Le détail de ces calculs ainsi que les références se retrouve à l'Annexe 1. Les sources directes incluent la dénitrification (N_2O) de l'azote minéral apporté en postlevée ainsi que la consommation de carburant (CO_2) liée à l'application de l'engrais. Les sources indirectes incluent les émissions de N_2O liées à la dénitrification à l'extérieur du champ de l'azote volatilisé sous forme ammoniacale ou lessivé sous forme de nitrate, ainsi que les émissions de CO_2 associées à la fabrication de l'engrais minéral. Dans le Rapport d'inventaire des GES, le potentiel de réchauffement planétaire (PRC) d'un kg de N_2O est fixé à 310 kg CO_2 (GIEC, 1995). Les émissions de N_2O (directes et indirectes), principalement liées à l'usage des engrais dans notre étude, sont associées au secteur agricole dans le Rapport d'inventaire et ont été calculées selon les travaux de Rochette et al. (2008), GIEC/OCDE/AIE (1997) et GIEC (2000) (Environnement Canada, 2013). Les émissions de CO_2 reliées à la consommation de carburant diesel pour l'épandage d'engrais en post levée sont calculées à partir des travaux de McCann et al. (2000) et Graham et al. (2008), tandis que la consommation de carburant du tracteur a été estimée à partir des références économiques du CRAAQ (CRAAQ, 2011). Ces émissions sont associées au secteur de l'énergie dans le Rapport d'inventaire des GES. Les émissions indirectes de CO_2 reliées à la fabrication d'engrais sont calculées à partir de la consommation de gaz naturel comme matière première (Section A3.2.1 : Environnement Canada, 2013) et des émissions de CO_2 qui lui sont associées (Tableau A8.1 : Environnement Canada, 2013) (McCann et al., 2000). Ces émissions sont associées au secteur des procédés industriels dans le Rapport d'inventaire des GES. Le prix de l'engrais azoté a été fixé à 1,714 \$/kg N, soit la valeur moyenne du prix de l'urée, livrée en vrac sans escompte, en 2012 et 2013 (CRAAQ, 2013a). Le prix de l'urée avoisine celui des solutions azotées les plus couramment utilisées en postlevée dans la culture de maïs.



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

GES	Source	Facteurs d'émission		
		N ₂ O kg N-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	8,28	
	Indirecte (dénitrification suite à la volatilisation de NH ₃ ou au lessivage de NO ₃)	0,0085	4,14	
CO ₂	Directe (consommation de carburant pour l'épandage de l'engrais minéral)	-		4,91
	Indirecte (fabrication de l'engrais)		3,81	

3. RÉSULTATS

3.1. Les rendements en maïs-grain et la teneur en nitrates

L'analyse de variance sur les rendements de maïs est présentée au tableau 5. L'incorporation rapide s'est traduite par un effet significatif sur les rendements uniquement sur les sites 4 (effet négatif de l'incorporation rapide) et 6 (effet positif de l'incorporation rapide). Suite à l'application de lisiers sur les autres sites, il n'y aurait pas eu de réponse du maïs à l'application d'azote supplémentaire en postlevée, que le lisier soit incorporé rapidement ou non. Ni la dose d'azote apportée en postlevée ni son interaction avec l'incorporation rapide des lisiers n'ont eu d'effet significatif sur les rendements.



Tableau 5. Effets de l'incorporation rapide du lisier, de la dose de N et de leur interaction sur les rendements de maïs et analyses de nitrate en postlevée pour chaque site

Site	Rendement moyen à 15 % humidité relative	Effet traitement	Test de Fisher	Coefficient de variation	N-NO ₃ postlevée
	t/ha		Probabilité > F		
1 (2012)	8,4	Incorporation	0,70	13	34
		Dose N	0,97		
		N*Incorpo	0,22		
2 (2013)	9,0	Incorporation	0,47	13	47
		Dose N	0,39		
		N*Incorpo	0,98		
3 (2012)	9,5	Incorporation	0,40	11	66
		Dose N	0,14		
		N*Incorpo	0,82		
4 (2012)	10,7	Incorporation	0,05	16	48
		Dose N	0,67		
		N*Incorpo	0,66		
5 (2013)	6,8	Incorporation	0,13	11	13
		Dose N	0,28		
		N*Incorpo	0,29		
6 (2013)	10,9	Incorporation	0,09	6	34
		Dose N	0,70		
		N*Incorpo	0,36		
7 (2012)	10,3	Incorporation	0,15	8	24
		Dose N	0,26		
		N*Incorpo	0,34		
8 (2012)	7,2	Incorporation	0,53	13	20
		Dose N	0,25		
		N*Incorpo	0,51		

D'après ces résultats, il semble difficile de démontrer que l'incorporation rapide des lisiers augmente l'efficacité de son azote, du moins en conditions de production de Chaudière-Appalaches. En revanche, le manque de réponse à l'azote en postlevée semble démontrer que les producteurs de cette région pourraient épargner des sommes considérables relativement à l'achat d'engrais de synthèse et que le bilan de GES à la ferme et la qualité de l'environnement pourraient être améliorés.

La figure 8 présente les rendements en maïs-grain pour les huit dispositifs implantés en 2012 et 2013. Sur le site 4, l'incorporation rapide des lisiers aurait produit des rendements moyens de 9,9 tm/ha, comparativement à 11,6 tm/ha sans incorporation rapide. Sur le site 6, l'incorporation rapide aurait produit des rendements de 11,3 tm/ha, comparativement à 10,6 tm/ha sans incorporation rapide. Il importe de préciser que les rendements en grains ont été évalués à l'échelle de la parcelle expérimentale et qu'ils sont généralement plus élevés que les rendements moyens de la Financière agricole du Québec pour la région. Les parcelles sont généralement établies à l'intérieur du champ où les conditions de production sont bonnes, la mesure des rendements n'inclut pas les effets de bordure et les pertes de battage sont moindres.

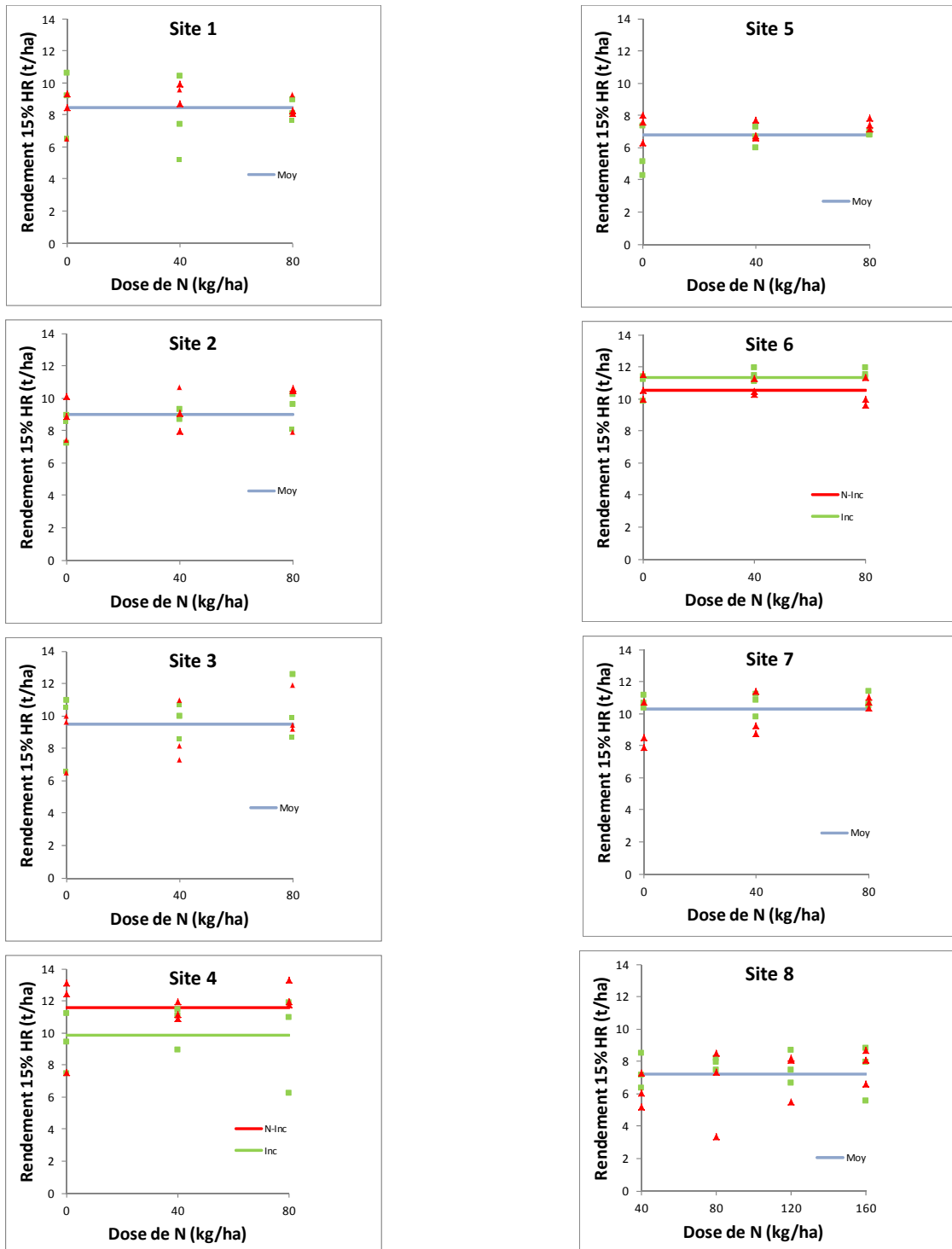


Figure 8. Rendements en maïs-grain (à 15 % d'humidité relative) pour les huit sites en fonction des doses d'azote minéral apportées en postlevée et de l'incorporation rapide ou non des lisiers



Les résultats obtenus sur le site 4 vont à l'encontre des résultats anticipés alors que l'effet positif de l'incorporation rapide sur l'efficacité de l'azote s'est manifesté sur le site 6. Sur le site 4, les baisses de rendement obtenues lorsque le lisier a été incorporé rapidement pourraient s'expliquer par les conditions de stress hydrique de 2012 combinées à la position de ces parcelles qui se retrouvaient systématiquement sur le milieu (ou le dessus) de la planche. Le coefficient de variation de ce site était aussi plus élevé (16 %), en raison de rendements nettement plus faibles (< 9 tm/ha) dans quelques parcelles, malgré le rendement moyen élevé (environ 11 tm/ha) mesuré sur l'ensemble du site.

Le tableau 6 présente les caractéristiques de chaque site ayant eu un effet potentiel sur la réponse du maïs à l'ajout d'azote minéral en postlevée. La teneur en matière organique ainsi que la susceptibilité du sol à la compaction (teneur en argile) sont des propriétés du sol qui peuvent exercer une influence sur le prélèvement de l'azote. L'apport régulier d'azote sous forme d'engrais organique influence également la fourniture d'azote à moyen et long termes. Enfin, la teneur en NO₃ en postlevée est l'indicateur qui semble le mieux corrélé à la probabilité de réponse à l'azote du maïs (N'Dayegamiye et al., 2011; Nyiraneza et al., 2010). Le site 3 se démarque des autres sites par une teneur plus élevée en matière organique, et ce, en raison de la présence de zones de sol organique. Également, la teneur en NO₃ mesurée en postlevée était supérieure aux autres sites, possiblement en raison de la forte minéralisation de la matière organique combinée à l'épandage de lisier au printemps.

Tableau 6. Facteurs qui exercent potentiellement une influence sur la réponse du maïs à l'ajout d'engrais azoté minéral en postlevée

Site	Matière organique %	Argile %	Teneur en NO ₃ postlevée mg/kg	N ajouté			
				Automne kg N/ha	Printemps kg N/ha	Démarrreur kg N/ha	Total kg N/ha
1	7.1	50	34	0	172	31	203
2	5.8	15	47	0	141	27	168
3	20.3	28	66	0	145	26	171
4	6.6	37	48	163	249	0	412
5	7.0	14	13	0	130	0	130
6	10,1	28	34	0	259	0	259
7	5.9	22	24	0	68	36	104
8	2.6	28	20	0	391	0	391

La teneur en argile influence la susceptibilité des sols à la compaction. Gregorich et al. (2011) ont démontré que la compaction des sols argileux génère moins de rendements et laisse davantage d'azote résiduel en fin de saison comparativement aux sols non compactés. Le prélèvement de l'azote par le maïs n'a pas été limité par la disponibilité de l'azote, mais plutôt par la dégradation des propriétés physiques découlant de la compaction. L'incorporation rapide des lisiers peut requérir un passage supplémentaire de machinerie et peut créer une croûte de battance sur un sol mouillé par le lisier avec une teneur élevée en argile, comme sur le site 4. Sur ce site, outre la position du traitement sur la planche en conditions plus sèches, l'incorporation rapide en sol plus argileux aurait pu nuire à la productivité du maïs.



Plusieurs hypothèses peuvent expliquer l'absence de l'effet de l'incorporation rapide des lisiers sur l'efficacité de l'azote. L'apport régulier d'azote en provenance d'engrais organique est un facteur important qui influence la disponibilité de l'azote à moyen et long terme.

Comparé à l'azote minéral, l'ajout d'azote sous forme organique augmente la réserve d'azote organique du sol dont une fraction est immobilisée dans le sol et libérée lentement par minéralisation les années subséquentes (Gutser et al., 2005). La nouvelle édition du chapitre 10 du Guide de référence en fertilisation prévoit un arrière-effet de 16 et 8 % affecté à l'azote organique appliqué respectivement un an et deux ans avant la culture (CRAAQ, 2013b). L'ajout d'engrais organique contribue à augmenter la teneur en carbone labile du sol, ce qui favorise la minéralisation et la disponibilité de l'azote (Spargo et al., 2011). La teneur en carbone labile du sol serait d'ailleurs un bon indicateur de la minéralisation de l'azote organique (Culman et al., 2013). Par ailleurs, le patron d'épandage des lisiers est rarement uniforme à la grandeur du champ et encore moins à l'échelle de plus petites parcelles expérimentales. Malgré toutes les mesures prises pour contrôler les patrons d'épandage, une variabilité trop importante des apports d'engrais organiques a pu augmenter la variabilité des rendements et réduire l'effet de l'incorporation rapide des lisiers.

L'analyse de nitrate en postlevée est un bon indicateur de la réponse du maïs à la fertilisation azotée. Plusieurs essais menés aux États-Unis et au Canada ont conduit à la publication de guides de recommandations dans presque tous les états américains ainsi qu'en Ontario (Cantin, 2007). La plupart de ces guides font état d'un seuil critique de 20-25 mg/kg de N-NO₃, à partir duquel la réponse du maïs à l'engrais azoté serait limitée (Cantin, 2007). Dans des essais plus récents menés dans les régions de la Montérégie, de Lanaudière, de Nicolet et de Québec, les quelques sites ayant plus de 20-25 mg/kg de N-NO₃ en postlevée répondaient très peu à l'apport de N (N'Dayegamiye et al., 2011; Nyiraneza et al., 2010). À l'exception du site 5, tous les sites présentaient des teneurs en N-NO₃ supérieures au seuil critique (20-25 mg N-NO₃/kg) en postlevée. Sur le site 5, la faible teneur en postlevée (13 mg N-NO₃/kg) et même à la baisse par rapport à celle en début de saison (20 mg N-NO₃/kg) (tableau 2) indiquait plutôt des conditions d'immobilisation de N qui pourrait être liées à l'épandage de lisier de bovins laitiers plus pailleux (tableau 3).

En dépit d'une teneur en N-NO₃ en postlevée supérieure au seuil critique de 20-25 mg N-NO₃/kg, on peut émettre l'hypothèse que l'azote était disponible sur le site 4, mais la compaction ou la présence d'une croûte de battance créée par l'incorporation rapide a pu limiter le prélèvement de l'azote par le maïs. D'autre part, des conditions favorables à la minéralisation de l'azote (teneur élevée en matière organique et apport régulier d'engrais organique) sur les autres sites ont significativement contribué à la fourniture d'azote, ce qui peut expliquer l'absence de réponse du maïs à l'ajout d'engrais azoté en postlevée. La teneur en N-NO₃ en postlevée tend à confirmer cette observation pour la majorité des sites, sauf pour le site 5.



3.2. Les émissions de GES

L'incorporation rapide n'a pas généré des rendements supérieurs comparativement à l'absence d'incorporation. L'absence de réponse à l'ajout d'engrais azoté minéral en postlevée, que le lisier soit incorporé ou non, démontre que le sol est en mesure de fournir l'azote nécessaire à la croissance du maïs. Par conséquent, l'effet de l'incorporation rapide sur la réduction potentielle des émissions de GES n'a pu être démontré. En revanche, les résultats mettent en évidence le potentiel de réduire la dose d'azote (au démarreur ou en postlevée) et les émissions de GES sur des sols fréquemment fertilisés avec des effluents d'élevage.

Le potentiel de réduction des émissions de GES n'est donc pas basé sur l'effet de l'incorporation rapide des lisiers pour chacune des doses, mais plutôt sur l'absence de réponse, peu importe la dose d'azote minéral apportée en postlevée. Par conséquent, l'absence de réponse à l'engrais minéral apporté en postlevée soutient l'hypothèse qu'il y a moyen de réduire, sinon d'éliminer, l'usage d'engrais en postlevée pour produire le même niveau de rendement tout en réduisant les émissions de GES. Également, parmi les quatre sites n'ayant pas reçu de démarreur (site 4, 5, 6 et 8), aucun n'a répondu à l'apport d'azote minéral en postlevée. Ces résultats suggèrent que, dans certains champs, la dose d'azote au démarreur peut même être éliminée, sans réduction significative des rendements.

Le potentiel de réduction des émissions de GES associé à l'engrais minéral a été évalué en comparant la pratique actuelle et deux scénarios de réduction (tableau 7). Les recommandations dans la deuxième 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). Pour un apport de lisier de porcs au printemps, on crédite généralement jusqu'à 50 kg N/ha. La pratique actuelle représente un niveau d'utilisation moyen des engrais minéraux avec l'application de lisier au printemps, et correspond à l'ajout de 30 kg N/ha comme démarreur et de 60 kg N/ha en postlevée pour un total de 90 kg N/ha. Le scénario 1, plus conservateur, maintient l'ajout d'un démarreur mais exclut l'épandage d'azote minéral en postlevée. Le scénario 2 exclut l'ajout d'un démarreur et d'un engrais minéral en postlevée. Les émissions de GES associées à l'apport de l'azote organique n'ont pas été comptabilisées.

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

	Ajout d'un démarreur (kg N/ha)	Ajout de N minéral en postlevée (kg N/ha)	Total N minéral (kg N/ha)
Pratique actuelle	30	60	90
Scénario 1	30	-	30
Scénario 2	-	-	0

La réduction potentielle des doses d'engrais minéraux azotés n'est pas reliée à l'incorporation rapide des lisiers en présemis. C'est plutôt l'apport fréquent d'engrais organique et la teneur relativement élevée en matière organique (contexte agricole de la région de Chaudière-Appalaches) qui s'est traduit par l'absence



de réponses à l'engrais azoté apporté en postlevée. Le potentiel de réduire les émissions de GES est donc fonction de la réduction de la consommation d'engrais minéral azoté. Le tableau 8 illustre le potentiel de réduction des GES en éliminant l'apport d'azote minéral (postlevée et démarrage + postlevée).

Tableau 8. Réductions potentielles des émissions de GES en fonction de deux scénarios de réduction des engrais minéraux dans le maïs-grain

Scénarios	Dose totale N minéral (kg/ha)	Émissions					Coûts N minéral (\$/ha)
		Directes		Indirectes		Totales	
		N ₂ O	CO ₂	N ₂ O	CO ₂		
		kg éq. CO ₂ /ha					
Pratique actuelle	90	745	5	373	343	1466	154
Sans apport de N en postlevée	30	248	5	124	114	491	51
Sans démarreur ni de N en postlevée	0	0	0	0	0	0	0

Dans un premier temps, il importe de mentionner que les émissions directes et indirectes de N₂O (dénitrification de l'engrais azoté de synthèse) et les émissions indirectes de CO₂ (fabrication de l'engrais azoté de synthèse) représentent les principales sources de GES. Les émissions directes de CO₂ reliées à la consommation de carburant pour l'épandage sont très faibles en comparaison. L'élimination d'au moins l'application d'azote minéral en postlevée dans le maïs (60 kg N/ha) semble envisageable sur l'ensemble des sites dont les sols sont relativement riches en matière organique (> 5 %) et qui reçoivent des engrais organiques sur une base régulière. Il pourrait ainsi en résulter une baisse des émissions de GES d'environ 975 kg éq. CO₂/ha. Par rapport à la pratique actuelle, l'élimination de 60 kg N minéral/ha se traduirait par une économie d'environ 100 \$/ha.

Comme mentionné, les quatre sites qui n'ont pas reçu une dose d'azote minéral comme démarreur (site 4, 5, 6 et 8) n'ont pas répondu non plus à l'apport d'azote en postlevée. Dans ce contexte, si aucun démarreur (30 kg N/ha) et aucun engrais minéral n'est apporté en postlevée (60 kg N/ha), la réduction des émissions de GES pourrait atteindre 1466 kg éq. CO₂/ha, ce qui correspond à une économie d'engrais minéral de 154 \$/ha.



4. APPLICATIONS POSSIBLES

L'ensemble des sites ont produit des rendements très acceptables. Les conditions climatiques ont 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. Aucun des huit sites n'a répondu à l'ajout d'engrais minéral en postlevée. L'ajout fréquent d'engrais organiques ainsi que le taux de matière organique des sols relativement élevé (> 5 %) ont favorisé la minéralisation de l'azote.

En revanche, l'effet positif de l'incorporation a été significatif seulement sur un site, alors qu'un effet négatif s'est manifesté sur un autre site. La formation d'une croûte suite à l'incorporation rapide du lisier ou la répartition non aléatoire du traitement d'incorporation rapide au sein du dispositif pourrait expliquer ce résultat non attendu. L'incorporation rapide implique un passage supplémentaire de la machinerie sur un sol mouillé par le lisier lorsque l'équipement d'incorporation n'est pas sur la citerne. Ces conditions peuvent avoir contribué à la formation d'une croûte à la surface du sol qui limite l'efficacité de l'azote.

Finalement, le projet a permis de démontrer le potentiel de réduire les émissions de GES en réduisant l'utilisation d'engrais minéral en postlevée. En éliminant une application d'azote en postlevée équivalent à 60 kg N/ha, les producteurs pourraient économiser plus de 100 \$ en frais d'engrais et réduire leurs émissions de GES de plus de 975 kg éq. CO₂/ha, davantage en n'apportant pas d'azote au démarrage (1466 kg éq. CO₂/ha). Par conséquent, il est primordial de comptabiliser davantage la contribution des sols et l'arrière effet des engrais organiques dans la régie de fertilisation afin d'appliquer la dose adéquate d'azote minéral.

5. RÉFÉRENCES POUR INFORMATION

Pour obtenir de l'information supplémentaire sur le projet, vous pouvez communiquer avec :

Monsieur 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

Mobile : 418 805-8374

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

Site internet : www.irda.qc.ca



6. RÉFÉRENCES

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

Chantigny, M.H., D.A. Angers, G. Bélanger, P. Rochette, N. Eriksen-Hamel, S. Bittman, K. Buckley, D. Massé and M.O. Gasser, 2008. *Yield and nutrient export of grain corn fertilized with raw and treated liquid swine manure*. *Agron. J.*, 100: 1303-1309.

Culman, S.W., S.S. Snapp, J.M. Green and L.E. Gentry, 2013. *Short- and Long-Term Labile Soil Carbon and Nitrogen Dynamics Reflect Management and Predict Corn Agronomic Performance*. *Agronomy journal*, 105(2): 493-502.

CRAAQ. 2010. *Guide de référence en fertilisation (2^e édition)*. Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec. 473 p.

CRAAQ. 2011. *Références économiques. Machinerie. Coûts d'utilisation et taux à forfaits suggérés*. Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec. 24 p.

CRAAQ. 2013a. *Prix des fertilisants et amendements*. Agdex 540/833, mai 2013. Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec. 1 p.

CRAAQ. 2013b. *Chapitre 10. Les engrais de ferme et les matières résiduelles (pdf)*. 3^e édition du Guide référence en fertilisation. Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec. 55 p.

Environnement Canada. 2013. *Rapport d'inventaire national 1990–2011 : Sources et puits de gaz à effet de serre au Canada*. http://publications.gc.ca/collections/collection_2013/ec/En81-4-2011-2-fra.pdf

GIEC. 2000. *Recommandations du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat en matière de bonnes pratiques et de gestion des incertitudes pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre*. Programme relatif aux inventaires nationaux de gaz à effet de serre. http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/french/gpgaum_fr.html

GIEC/OCDE/AIE. 1997. *Lignes directrices du GIEC pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre – version révisée 1996*. Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, Organisation de coopération et de développement économique et Agence internationale de l'énergie. <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/french.html>

GIEC. 1995. *Contribution du Groupe de travail I au 2^e Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat*. Cambridge University Press. Cambridge, Royaume Uni. p. 22. http://unfccc.int/ghg_data/items/3825.php



Graham et al. 2008. *Greenhouse gas emissions from heavy-duty vehicles*. Atmospheric Environment, 42: 4665-4681.

Gregorich, E.G., D.R. Lapen, B.L. Ma, N.B. McLaughlin and A.J. VandenBygaart, 2011. *Soil and Crop Response to Varying Levels of Compaction, Nitrogen Fertilization, and Clay Content*. Soil science Society of America Journal, 75(4): 1483-1492.

Gutser, R., T.H. Ebertseder, A. Weber, M. Schraml and U. Schmidhalter, 2005. *Short-term and residual availability of nitrogen after long-term application of organic fertilizers on arable land*. J. Plant Nutr, Soil Sci., 168: 439-446.

McCann, T.J. 2000. *Fossil fuel and derivative factors*. Rapport préparé pour Environnement Canada par T.J. McCann and Associates Ltd.

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 n° 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(5): 1478-1490.

Rochette, P., D.E. Worth, R.L. Lemke, B.G. McConkey, D.J. Pennock, C. Wagner-Riddle et R.L. Desjardins. 2008. *Estimation of N₂O emissions from agricultural soils in Canada*. I. Development of a country-specific methodology. Canadian Journal of Soil Science, 88:641-654.

SAS Institute, 2003. *SAS User's Guide*, Statistics, Version 9.2, SAS Inst., Carry, NC.

Spargo, J.T., M.A. Cavigelli, S.B. Mirsky, J.E. Maul, J.J. Meisinger, 2011. *Mineralizable soil nitrogen and labile soil organic matter in diverse long-term cropping systems*. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 90(2): 253-266.



ANNEXE 1

Méthodologie pour le calcul des gaz à effet de serre

1. Émissions directes de N₂O associées aux applications d'engrais minéraux azotés (dénitrification) (Rochette et al., 2008)

$$N_2O_{ESA} = (N_{ENG} \times CE_{BASE}) \times \frac{44}{28}$$

où : N₂O_{ESA} = émissions provenant des engrais synthétiques azotés (kg N₂O/an)

N_{ENG} = consommation totale d'engrais synthétiques (kg N/an)

CE_{BASE} = coefficient d'émission : 0,017 (kg N-N₂O/ kg de N)

$\frac{44}{28}$ = coefficient de conversion du N-N₂O en N₂O

2. Émissions indirectes de N₂O associées aux applications d'engrais minéraux azotés (GIEC/OCDE/AIE, 1997 et GIEC, 2000)

2.1 Volatilisation (GIEC/OCDE/AIE, 1997)

$$N_2O_{VD} = (N_{ENG} \times FRAC_{GASF} \times CE_{VD}) \times \frac{44}{28}$$

où : N₂O_{VD} = émissions attribuables à la volatilisation et au dépôt de l'azote (kg N₂O/an)

N_{ENG} = consommation totale d'engrais synthétiques (kg N/an)

FRAC_{GASF} = fraction de l'azote d'engrais synthétiques épandus sur les sols qui se volatilise sous forme de N-NH₃ et de N-NO_x : 0,1 (kg N-NH₃ + N-NO_x/kg N)

CE_{VD} = coefficient d'émission attribuable à la volatilisation et au dépôt : 0,01 (kg N-N₂O/kg N)

$\frac{44}{28}$ = coefficient de conversion du N-N₂O en N₂O

2.2 Lessivage et ruissellement (GIEC/OCDE/AIE, 1997 et GIEC, 2000)

$$N_2O_L = (N_{ENG} \times FRAC_{LESSIVAGE} \times CE_{LESSIVAGE}) \times \frac{44}{28}$$

où : N₂O_L = émissions attribuables au lessivage et au ruissellement d'azote (kg N₂O/an)

N_{ENG} = consommation totale d'engrais synthétiques (kg N/an)



$FRAC_{\text{LESSIVAGE}}$ = fraction de l'azote perdue par lessivage et ruissellement : 0,3 (kg N/kg N) pour la zone climatique du Québec

$CE_{\text{LESSIVAGE}}$ = coefficient d'émission attribuable au lessivage/ ruissellement : 0,025 (kg N-N₂O/kg de N)

$\frac{44}{28}$ = coefficient de conversion du N-N₂O en N₂O

3. Émissions directes de CO₂ associées aux applications d'engrais minéraux azotés

La consommation de carburant pour l'application de l'engrais

$$CO_{2\text{CARB}} = \text{Cons}_{\text{CARB}} \times CE_{\text{CARB}}$$

où : $CO_{2\text{CARB}}$ = émissions attribuables à la consommation de carburant (kg éq CO₂/ha)

$\text{Cons}_{\text{CARB}}$ = consommation de carburant diesel (L/ha)

CE_{CARB} = coefficient d'émission attribuable à la combustion du carburant : 3,007 (kg éq CO₂/L)

La consommation de carburant diesel pour l'épandage d'engrais en post levée a été estimée à 1,81 L/ha pour un tracteur de 46 kW (62 HP) à l'aide des références économiques du CRAAQ (CRAAQ, 2011).

Les coefficients d'émission attribuables à la combustion du carburant sont calculés à partir des coefficients du tableau A8-11 de l'Inventaire canadien (Environnement Canada, 2013). Ces coefficients sont adaptés des travaux de McCann et al. (2000) et Graham et al. (2008).

	Coefficients d'émission (g/L de combustible)		
	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Véhicules lourds à moteur diesel (dispositif perfectionné)	2663	0,11	0,151
Potentiel de réchauffement planétaire	1	23	310

	Coefficients d'émission (g éq CO ₂ /L de combustible)			
	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	Total
Véhicules lourds à moteur diesel (dispositif perfectionné)	2663	2,5	47	2,71

4. Émissions indirectes de CO₂ associées à la fabrication des engrais minéraux azotés (utilisation du gaz naturel pour la fabrication de l'ammoniac)

La fabrication d'une tonne d'ammoniac (NH₃) par le procédé Haber-Bosch nécessite en moyenne 671 m³ de gaz naturel comme matière première (Section A3.2.1 : Environnement Canada, 2013). Le gaz naturel peut également constituer une source d'énergie dans le procédé mais cette source est exclue du calcul. Au Québec, 1 878 g de CO₂ est émis pour l'utilisation d'un m³ de gaz naturel (Tableau A8.1 : Environnement Canada, 2013) (McCann et al., 2000), ce qui correspond à 4,62 kg éq. CO₂/kg NH₃ ou 3,81 kg éq. CO₂/kg N.