

**EFFET DU DÉLAI DE DESTRUCTION D'UN PRÉCÉDENT DE CULTURE DE COUVERTURE DE
RADIS, D'AVOINE ET DE POIS SUR L'ÉQUIVALENT EN AZOTE MINÉRAL DU MAÏS-GRAIN**

19-007-3.1-F-PROC

DURÉE DU PROJET : 03-2019 / 03-2022

RAPPORT FINAL

Réalisé par :
Catherine Mercier, M.Sc. et Cécile Tartera, agr., Groupe ProConseil

15 mars 2022

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.

EFFET DU DÉLAI DE DESTRUCTION D'UN PRÉCÉDENT DE CULTURE DE COUVERTURE DE RADIS, D'AVOINE ET DE POIS SUR L'ÉQUIVALENT EN AZOTE MINÉRAL DU MAÏS-GRAIN

19-007-3.1-F-PROC

1. RÉSUMÉ DU PROJET

Ce projet visait à bonifier les connaissances appliquées à propos des cultures de couverture (CC) afin de valoriser leur utilisation et améliorer leur gestion. Dans le cadre de ce projet, les CC sont étudiées principalement comme source d'azote (N) pour la culture suivante de maïs grain, apport qui varie selon les mélanges utilisés et les périodes (ou l'absence) d'incorporation. Différents outils d'estimation d'apports en N ont ainsi été étudiés.

Pendant la saison 2019, deux parcelles ont été mises en place chez des agriculteurs (site A et site B) de la Montérégie. Après la récolte de la céréale, une application de lisier a été effectuée. Deux mélanges de CC ont été faits; soit avec ou sans une espèce légumineuse. Une partie du champ du projet est désignée comme zone témoin, donc sans semence de CC. Les parties semées ont été séparées en deux pour comparer deux moments d'incorporation des CC dans les sols; à l'automne et au printemps. Par contre, dans un des cas (site B), les CC n'ont pu être incorporées à l'automne en raison des conditions climatiques et de récoltes difficiles de la saison 2019. En effet, puisque les récoltes se sont terminées très tardivement et que la neige, puis le gel se sont installés rapidement, le producteur du site B n'a pas été en mesure d'incorporer les CC, car le sol était gelé. Puisque les cultures n'avaient que très peu poussé avant le gel et que leur apport en azote aurait été négligeable, il a été décidé de ne pas poursuivre le projet sur ce site.

Il avait été prévu de réimplanter des zones de cultures de couverture chez le producteur du site B en 2020, mais encore une fois, la récolte a été tardive, puis les conditions étaient trop mouillées et la date de semis était rendue trop avancée pour que les cultures aient le temps de produire suffisamment de biomasse avant l'hiver. Le site a donc été abandonné de nouveau. Deux nouveaux sites (site C et D) ont par contre été implantés, où suite à la récolte de la céréale ou de la prairie, deux mélanges de CC ont été semés dans, et une zone témoin a été conservée, et ce, en répliquant le schéma 3 fois.

2. OBJECTIFS ET APERÇU DE LA MÉTHODOLOGIE

Le projet visait l'utilisation des CC comme source d'azote dans la culture du maïs grain en régie conventionnelle. Les CC ont le potentiel de s'imposer comme source d'azote pour la culture du maïs, c'est pourquoi l'étude de l'incorporation des CC (présence ou non, moment, composition) s'avère pertinente afin de prédire leur apport de N pour la culture suivante. L'étude servira également à comparer les outils et techniques actuellement disponibles pour prédire l'apport en N des CC implantées au bénéfice de la culture suivante.

Les sites suivants ont été sélectionnés :

- **Site A** : Saint-Antoine-sur-Richelieu, Québec

(- Site B : Saint-Mathias-sur-Richelieu. Ce site n'a pas pu être utilisé finalement malgré les 2 tentatives en 2019 et 2020 de semer rapidement les CC à l'automne).

- **Site C** : Sainte-Victoire-de-Sorel, Québec

- **Site D** : Saint-Aimé, Québec.

La dimension et la répartition spatiale des parcelles ont été déterminées en fonction des champs sélectionnés et de la taille des différentes machineries des producteurs. Voici les caractéristiques des sites :

Tableau 1: Équipements des producteurs agricoles et dimensions des parcelles

	Site A		Site C		Site D	
Culture avant les CC	orge		prairie de graminées		blé d'automne	
Équipements						
Semoir CC	semoir à céréales	15 pi	semoir à céréales	10 pi	semoir à céréales	10 pi
Équipement travail de sol 1	chisel	14 pi	chisel	16 pi	chisel	14 pi
Équipement travail de sol 2	offset/vibro	16/22 pi	déchaumeuse	13 pi	chisel	14 pi
Semoir MG	planteur 6 rangs	15 pi	planteur 12 rangs	30 pi	planteur 6 rangs	15 pi
Batteuse	6 rangs	15 pi	8 rangs	20 pi	6 rangs	15 pi
Dimensions parcelles						
	pi	m	pi	m	pi	m
Largeur des parcelles de CC	90	27,4	60	18	90	27,4
Largeur des parcelles témoin	29,9	9,1	66	20	30	9
Cintre (tout autour)	90	27,4				
Longueur des parcelles	295	90	295	90	525	160
Surface/mélange de CC (ha)	0,7		0,5		1,3	

Voici les rotations et les caractéristiques des sols des champs choisis par site :

Tableau 2: Historique de rotations des champs pour chacun des sites et caractéristiques des sols

Site	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	CEC	MO (%)	pHe	Type de sol
A	orge	maïs	soya	maïs	soya	orge	maïs		30,8	4,9	6,2	argileux
C		blé	maïs	maïs	soya	blé	prairie	maïs	13,2	4	6,5	loam
D	prairie	prairie	soya	maïs	soya	maïs	blé	maïs	13,8	4,5	6,1	loam sableux

Au site A, les parcelles de CC ont été semées le 26 août 2019, puis le lisier a été épandu le 6 septembre. Les parcelles à être incorporées à l'automne l'ont été avec un chisel, et au printemps avec un vibroculteur. L'évaluation de la couverture des CC et la récolte de biomasse par quadra a été effectuée le 4 novembre 2019. Au printemps 2020 (17 et 18 juin), au stade 6 feuilles du maïs, les différentes doses d'azote pour la parcelle témoin ont été appliquées manuellement. Les blocs comprennent chacun 5 traitements comportant différentes doses de N en post-levée (0 N, 50 N, 100 N, 150 N et 200 N), répétés quatre fois. Voir les dispositifs et les différentes doses à l'Annexe 1. Ces parcelles servent à établir une courbe de réponse du maïs à l'engrais minéral. Dans chacune des zones avec CC, des bandes sans engrais azoté (sauf pour 50 kg de N/ha au démarrage) ont été délimitées pour calculer le rendement de maïs avec les CC comme apport principal d'azote. Finalement, les récoltes manuelles ont été faites au sein de ces mêmes parcelles le 2 et 3 novembre 2020.

Au site D, suite à la récolte à l'automne 2020, une application de fumier a été effectuée sur toute la superficie du champ le 26 août 2020. Ensuite, aux sites C et D, deux mélanges de CC ont été implantés à la volée (respectivement le 28 août et le 4 septembre). Les dispositifs expérimentaux sont présentés aux Annexes 1 et 2. La récolte de biomasse des différentes sections de CC a été effectuée le 13 novembre aux 2 sites. Une section de chacun des deux mélanges a été incorporée à l'automne 2020 (les 14 et 13 novembre respectivement), et une autre section l'a été au printemps 2021. Le maïs grain a ensuite été semé avec un engrais minéral de démarrage d'une dose de 50 kg de N/ha. Des dispositifs en blocs aléatoires ont également été mis en place aux sites C et D dans les zones témoins (sans CC) pour établir une courbe de réponse du maïs par rapport à la fertilisation minérale en N. Les récoltes des différentes sections ont été effectuées le 13 octobre au site C et le 20 octobre 2021 au site D.

Voici les résumés des semis de CC et d'épandage d'engrais de ferme :

Tableau 3: Détails des semis de CC et des engrais organiques

	Site A	Site C	Site D
Date semis CC	26/08/2019	28/08/2020	4/09/2020
Équipement de semis	Semoir à céréales Great Plains 15 pi	Semoir à céréales	Semoir à céréales
Mélange #1 (quantité (kg/ha))	60,0	67,5	81,3
avoine (A et D) ou blé (C)	54,5	60,0	72,6
radis Daïkon	5,5	7,5	8,7
Mélange #2 (quantité (kg/ha))	110,0	105,0	108,8
pois	69,8	60,0	45,9
avoine (A et D) ou blé (C)	34,9	40,0	55,1
radis Daïkon	5,3	5,0	7,8
Épandage lisier : Type	bovin laitier	aucun	bovin laitier
Date épandage	06/09/2019	-	26/08/2020
Dose	9,4 t/ha	-	4900 gallons/acre
Incorporation	non incorporé	-	chisel
Incorporation des CC			
Automne	10/11/2019	14/11/2020	13/11/2020
Printemps	27/04/2020		

3. RÉSULTATS SIGNIFICATIFS OBTENUS

3.1 Méthode de l'équivalent en azote minéral

Afin de calculer l'apport en N des cultures couverture, les l'impact de la période d'incorporation et les types de mélange sont d'abord étudiés. Les rendements de chacune des parcelles ont été calculés par la méthode manuelle bonifiée par Gilles Tremblay, agr. (avec la pesée des épis provenant de 10 m d'un rang, la pesée des grains de 3 épis et la mesure du taux d'humidité des grains). La moyenne de 3 mesures par parcelle a été calculée, puis la moyenne des 3 blocs de répétition également. Les rendements des parcelles témoins avec différentes doses de N minéral ont ensuite été compilés en faisant la moyenne des 4 blocs de répétition. Ces données des blocs témoins correspondent à la réponse du maïs à l'azote minéral.

Tableau 4: Rendements des blocs témoins du site A

Traitement	Dose d'azote appliqué (kg/ha)	Moyenne des rendements de maïs (t/ha)
T1	0	10,32
T2	50	10,7
T3	100	10,55
T4	150	11,37
T5	200	11,55

Ces données ont été mises en relation sous forme de graphique et l'équation qui obtenait le meilleur coefficient de détermination ($R^2 = 0,8577$) était de type linéaire ($y = 0,0063x + 10,272$).

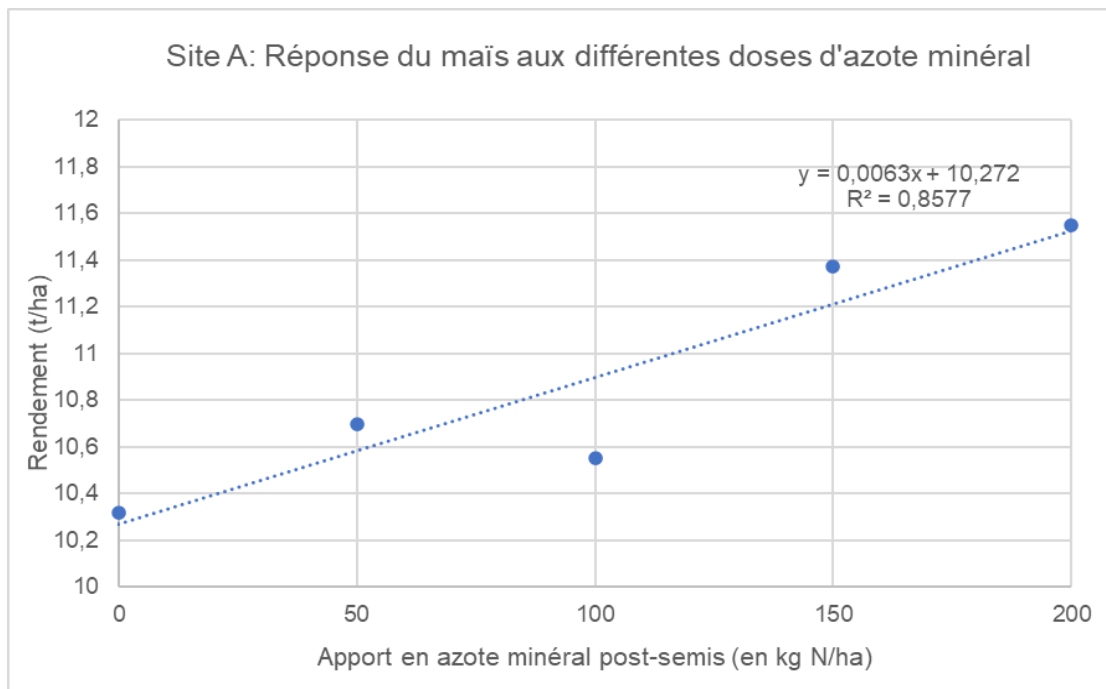


Figure 1: Réponse du maïs à l'apport d'azote minéral au site A

L'équation résultante a permis de calculer l'équivalent en N minéral pour ce champ, soit la quantité de N minéral correspondant aux rendements obtenus dans les parcelles de maïs avec les CC et qui n'ont pas reçu de N en post-semis.

Tableau 5: Site A: Rendements des différents traitements et méthodes de gestion et leur équivalent en azote minéral post-semis

Mélange	Traitement	Bloc	Rendement maïs (t/ha)	Rendement maïs moyen par méthode et par mélange (t/ha)	Équivalent N minéral* (kg N/ha)	Rendement maïs moyen par méthode pour les 2 mélanges (t/ha)	Équivalent N minéral * (kg N/ha)	Rendement maïs moyen par mélange (t/ha)	Équivalent N minéral *(kg N/ha)
1 CC	Incorporé à l' automne	1	10,4			Automne			
		2	9,0	9,7	0	Mélanges 1 et 2	0		
		3	9,8			9,53			
	Incorporé au printemps	1	10,1			Printemps			
		2	8,5	9,2	0	Mélanges 1 et 2	0	9,8	0
		3	9,0			9,80			
	Non-incorporé (semis-direct)	1	11,5			Semi-direct			
		2	9,3	10,4	13	Mélanges 1 et 2:	0		
		3	10,3			9,87			
2 CCL	Incorporé à l' automne	1	8,8						
		2	9,4	9,3	0				
		3	9,9						
	Incorporé au printemps	1	10,7						
		2	10,4	10,4	18			9,7	0
		3	10,1						
	Non-incorporé (semis-direct)	1	9,4						
		2	9,4	9,4	0				
		3	9,3						

* $x=(y-10,272) / 0,0063$

Dans ce cas du site A, seulement 2 traitements donnaient des résultats positifs d'équivalent en N minéral, soit le mélange 1 (sans légumineuse) en semi-direct, et le mélange 2 (avec légumineuse) incorporé au printemps, et ces deux valeurs (13 et 18) sont similaires statistiquement. En effet, les valeurs possibles se retrouvent dans un intervalle de 0 à 200. Les autres combinaisons (l'ensemble des parcelles pour chacun des mélanges ou pour le moment (ou l'absence) d'incorporation). Il s'agit d'un sol où le maïs répond assez bien à la fertilisation minérale. Alors que le semis des CC s'était effectué assez tôt à la fin de l'été, la quantité de biomasse produite était nettement moindre que pour les 2 autres sites (données présentées à la section 3.2).

Pour le site C, voici d'abord les rendements dans les parcelles témoins :

Tableau 6: Rendements des blocs témoins du site C

Traitement	Dose d'azote appliqué (kg/ha)	Moyenne des rendements de maïs (t/ha)
T1	0	10,6
T2	50	11,1
T3	100	12,1
T4	150	12,7
T5	200	12,6

Ces rendements ont permis d'établir un graphique, et c'est également l'équation linéaire qui obtenait le meilleur coefficient de corrélation. Cette équation a ensuite permis de calculer les équivalents en azote minéral.



Figure 2: Réponse du maïs à l'apport d'azote minéral au site C

Tableau 7: Site C : Rendements des différents traitements et méthodes de gestion et leur équivalent en azote minéral post-semis

Mélange	Traitement	Bloc	Rendement maïs moyen (t/ha)	Rendement maïs moyen par méthode et par mélange (t/ha)	Équivalent N minéral* (kg N/ha)	Rendement maïs moyen par méthode pour les 2 mélanges (t/ha)	Équivalent N minéral* (kg N/ha)	Rendement maïs moyen par mélange (t/ha)	Équivalent N minéral* (kg N/ha)
1 CC	Incorporé à l' automne	1	13,9			Automne			
		2	13,3	12,9	192	Mélanges 1 et 2:	136		
		3	11,5			12,2			
	Incorporé au printemps	1	14,1			Printemps			
		2	13,6	13,9	280	Mélanges 1 et 2:	237	13,6	253
		3	14,0			13,4			
	Non-incorporé (semi-direct)	1	11,6			Semis-direct			
		2	15,0	14,0	288	Mélanges 1 et 2:	242		
		3	15,5			13,5			
2 CCL	Incorporé à l' automne	1	12,2						
		2	11,9	11,6	79				
		3	10,6						
	Incorporé au printemps	1	13,9						
		2	11,3	12,9	194			12,5	156
		3	13,5						
	Non-incorporé (semi-direct)	1	13,0						
		2	13,2	12,9	195				
		3	12,5						

* $x=(y-10,658)/0,0116$

Comme il s'agit d'un modèle mathématique, certaines valeurs dépassent la plus grande dose de N en post-levée testée ici (200 kg/ha), mais ces chiffres sont théoriques et à considérer avec précaution car les études démontrent que les rendements atteignent un plateau malgré les doses de N plus importantes à partir d'un certain seuil, qui dépend des caractéristiques pédologiques. D'ailleurs les rendements avec 150 et 200 kg N/ha comme apports sont, à ce site, très similaires.

On observe ici que les équivalents en azote minéral (ENM) sont assez semblables peu importe si le l'incorporation est effectuée au printemps ou si elle est absente. Ces deux traitements donnent des ENM supérieurs aux parcelles ayant été incorporées à l'automne. Cela est probablement lié aux rapports C/N des CC (en moyenne 21 pour le mélange 1 et 17 pour le mélange 2). Selon Claude-Allan Joseph (2014), la minéralisation du N est la plus rapide et donc le N est le plus rapidement disponible quand le C/N est inférieur à 11, alors que pour des rapports entre 11 et 23, la minéralisation est moyenne, et elle est faible lorsque le rapport C/N est supérieur à 23. L'incorporation à l'automne représente peut-être ici un

délai trop élevé entre la minéralisation qui peut être suivie de pertes et le moment où les plants de maïs ont besoin de ce N.

De plus, le mélange 1, sans légumineuses, s'est soldé par des rendements plus élevés que pour le mélange 2 avec légumineuses, malgré que les moyennes des 2 traitements aient produit des biomasses semblables (2071 kg/ha et 2178 kg/ha respectivement).

Dans le cas du site D, les données présentent des résultats encore différents des 2 autres sites. Voici les rendements moyens des sites témoins :

Tableau 8: Rendements des blocs témoins du site D

Traitement	Dose d'azote appliqué (kg/ha)	Moyenne des rendements de maïs (t/ha)
T1	0	10,1
T2	50	10,2
T3	100	10,4
T4	150	10,6
T5	200	11,6

Dans ce cas, l'équation avec le meilleur R^2 était de type exponentiel. Les valeurs d'ENM ont été calculées à partir de cette équation.

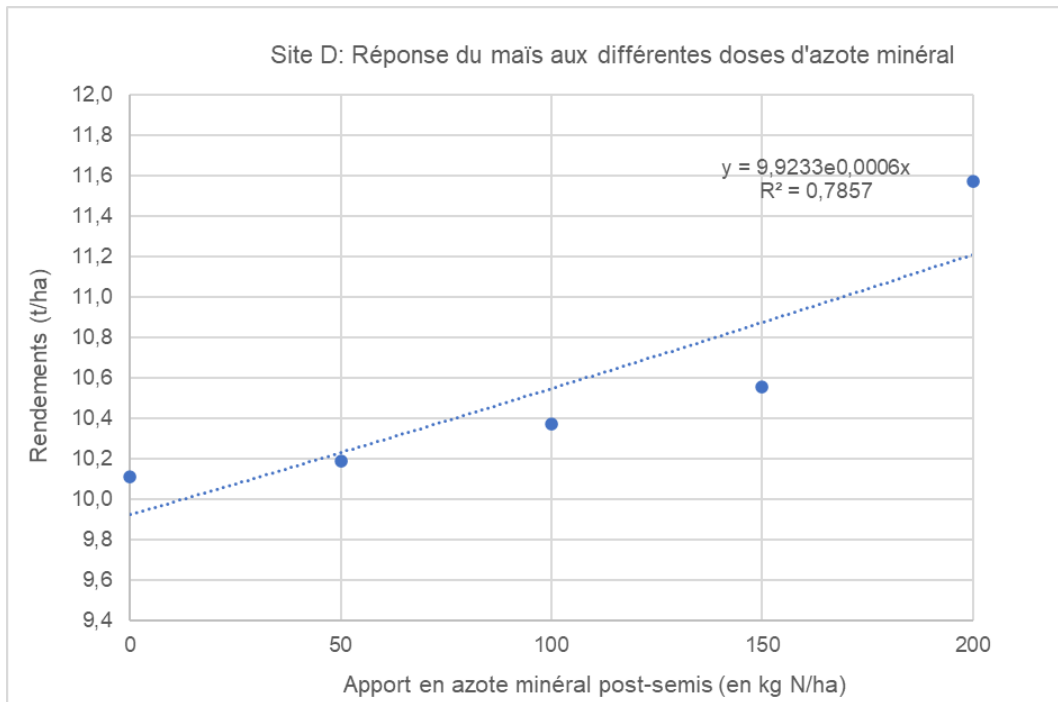


Figure 3: Réponse du maïs à l'apport d'azote minéral au site D

Tableau 9: Site D : Rendements des différents traitements et méthodes de gestion et leur équivalent en azote minéral post-semis

Mélange	Traitement	Bloc	Rendement maïs moyen (t/ha)	Rendement maïs moyen par méthode et par mélange (t/ha)	Équivalent N minéral * (kg N/ha)	Rendement maïs moyen par méthode pour les 2 mélanges (t/ha)	Équivalent N minéral * (kg N/ha)	Rendement maïs moyen par mélange (t/ha)	Équivalent N minéral *(kg N/ha)
1 CC	Incorporé à l'automne	1	7,28			Aut			
		2	8,79	9,56	0	Mél 1 et 2:	0		
		3	12,62			9,68			
	Incorporé au printemps	1	9,74			Pr			
		2	11,56	10,24	53	Mél 1 et 2:	0	9,80	0
		3	9,43			9,99			
	Non- incorporé (semis- direct)	1	7,58			SD			
		2	8,33	9,58	0	Mél 1 et 2:	80		
		3	12,83			10,41			
2 CCL	Incorporé à l'automne	1	7,75						
		2	7,74	9,79	0				
		3	13,89						
	Incorporé au printemps	1	7,96						
		2	8,77	9,73	0			10,25	55
		3	12,45						
	Non- incorporé (semis- direct)	1	12,01						
		2	9,58	11,24	208				
		3	12,13						

* $x = ((\ln(y/9,9233)))/0,0006$

À ce site également, une des valeurs d'ENM est supérieure au taux maximum d'azote appliqué manuellement en post-semis, donc cette valeur est une extrapolation mathématique. Seulement deux traitements avaient comme résultat un ENM positif : le mélange 1 sans légumineuse incorporé au printemps et le mélange avec légumineuse non-incorporé.

Ces essais au sein des 3 sites montrent que la présence des CC ne permet pas de fournir de l'azote directement pour la culture subséquente. Par contre, lorsque les conditions sont idéales, les CC peuvent y contribuer à la hauteur de 200 kg/ha d'azote minéral en post-semis. Il n'est toutefois pas possible de déterminer quelles sont ces conditions et quel traitement a été le plus efficace pour permettre le transfert de l'N.

Dans le guide de référence en fertilisation du Québec (CRAAQ, 2010), il est expliqué que les résidus végétaux laissés en surface se décomposent généralement à un taux équivalent aux deux tiers de celui des résidus enfouis, et qu'il serait donc préférable de les enfouir. Des études effectuées dans un contexte climatique de celui du Québec avaient également démontré que les ENM étaient plus élevés dans le maïs lorsque la CC de légumineuse précédente était détruite au début du printemps plutôt qu'à l'automne (Anne Vanasse, Agri-vision 2017). Par contre, lors d'essais au Québec sur les rendements de blé, il avait été

observé qu'il y avait peu d'effets quant à l'enfouissement à l'automne par rapport au printemps (Verville, 2014).

3.2 Apports potentiels d'azote selon la méthode MERCI

Les biomasses des CC récoltées à l'automne et leurs analyses en laboratoire ont permis d'estimer leurs apports potentiels en azote pour les cultures subséquentes.

Tableau 10: Site D: Apport probable d'azote provenant des CC selon la méthode MERCI

	Bloc 1			Bloc 2			Bloc 3			
Mélange #1 (Quadra 17'x17' = 2 pi ² = 0,186m ²)	Quadra #1	Quadra #2	Quadra #3	Quadra #1	Quadra #2	Quadra #3	Quadra #1	Quadra #2	Quadra #3	Moyenne
Poids humide (g)	69,80	124,00	149,40	111,30	138,40	112,80	103,40	84,30	263,40	
% matière sèche *	16,40	16,40	16,40	14,60	14,60	14,60	14,10	14,10	14,10	
Poids sec (g)	11,45	20,34	24,50	16,25	20,21	16,47	14,58	11,89	37,14	
Poids sec (kg/ha) (1ha = 107639 pi ²)	616	1094	1319	875	1087	886	785	640	1999	1033
N (%) *	2,72	2,72	2,72	3,18	3,18	3,18	2,78	2,78	2,78	3
Contenu en N biomasse aérienne	17	30	36	28	35	28	22	18	56	30
Apport de N potentiel (contenu en N X coeff racinaire X % relargué selon le C/N) **	10	18	22	17	21	17	13	11	33	18
Apport de N probable avec incorporation (apport de N potentiel X 0,7) (kg N/ha)	7	13	15	12	15	12	9	7	23	13
Apport de N probable sans incorporation (apport de N potentiel X 0,5) (kg N/ha)	5	9	11	8	10	8	7	5	17	9
Mélange #2 (Quadra 20'x 8,25' = 1,15pi ² , sauf pour Bloc 2 (2 pi ²))										
Poids humide (g)	66,90	24,20	78,80	84,00	102,40	109,60	42,10	101,70	75,50	
% matière sèche *	21,70	21,70	21,70	18,10	18,10	18,10	19,20	19,20	19,20	
poids sec (g)	14,52	5,25	17,10	15,20	18,53	19,84	8,08	19,53	14,50	
Poids sec (kg/ha) (1ha = 107639 pi ²)	1359	492	1601	818	998	1068	757	1828	1357	1142
N (%) *	2,72	2,72	2,72	3,26	3,26	3,26	3,53	3,63	3,53	3
Contenu en N biomasse aérienne (kg/ha)	36,96	13,37	43,53	26,68	32,52	34,81	26,71	66,34	47,90	37
Apport de N potentiel (contenu en N X coeff racinaire X % relargué selon le C/N) ** (kg N/ha)	23	8	27	17	20	22	17	41	30	23
Apport de N probable avec incorporation (apport de N potentiel X 0,7) (kg N/ha)	16	6	19	12	14	15	12	29	21	16
Apport de N probable sans incorporation (apport de N potentiel X 0,5) (kg N/ha)	12	4	14	8	10	11	8	21	15	11

* Le % de matière sèche et la teneur en N ont été mesurés pour 1 échantillon par bloc et utilisés pour les 3 quadras.

** Le coefficient racinaire est de 1,2 (mélange 1) et de 1,25 (mélange 2). Le % de N relargué est de 50 % pour les rapports C/N plus petits ou égaux à 15; de 40 % pour les rapports de 16 à 20, de 30% pour les rapports de 21 à 25, de 25% pour les rapports de 26 à 30.

La méthode MERCI découle du calcul de base de l'apport potentiel en azote (APA), qui permet d'estimer le contenu en N de la biomasse arienne en prenant en compte la biomasse sèche des CC (en t ms/ha) et la teneur en éléments nutritifs (en kg/t). La méthode MERCI (Méthode d'estimation des éléments restitués par les cultures intermédiaires) intègre l'APA ainsi que le contenu racinaire selon le mélange d'espèces et le pourcentage de minéralisation selon le rapport C/N. Elle a été montée suite à 8 ans de mesures terrain en grandes cultures en France, et grâce à des simulations avec le modèle Stics développé par l'INRA pour les données difficilement accessibles sur le terrain (niveau de restitution à la culture suivante).

Les résultats des apports de N pour le site A sont tous très similaires, que ce soit avec ou sans incorporation, et sont négligeables. Les valeurs sont en moyenne sous 15 kg N/ha pour le mélange 1 et sous 20 kg N/ha pour le mélange 2. Cela concorde assez bien avec les résultats obtenus avec la méthode de l'ENM.

Tableau 11: Site C : Apport probable d'azote provenant des CC selon la méthode MERCI

	Bloc 1			Bloc 2			Bloc 3			
Mélange #1 (Quadra 17'x17' = 2 pi ²)	Quadra #1	Quadra #2	Quadra #3	Quadra #1	Quadra #2	Quadra #3	Quadra #1	Quadra #2	Quadra #3	Moyenne
Poids sec (g)	36,57	35,46	29,31	36,41	22,80	41,97	44,41	45,53	53,91	
Poids sec (kg/ha) (1ha = 107639 pi ²)	1968	1908	1577	1960	1227	2259	2390	2450	2901	2071
N (%)	1,84	1,68	2,09	1,92	1,81	1,96	2,74	2,14	2,97	2
Contenu en N biomasse aérienne	36	32	33	38	22	44	65	52	86	45
Apport de N potentiel (contenu en N X coeff racinaire X % relargué selon le C/N) * (kg N/ha)	13	12	12	14	8	16	31	25	41	19
Apport de N probable avec incorporation (apport de N potentiel X 0,7) (kg N/ha)	9	8	8	9	6	11	22	18	29	13
Apport de N probable sans incorporation (apport de N potentiel X 0,5) (kg N/ha)	7	6	6	7	4	8	16	13	21	10
Mélange #2 (Quadra 17'x17' = 2 pi ²)										
Poids sec (g)	40,88	43,42	36,52	44,56	41,25	31,87	41,57	51,15	32,96	
Poids sec (kg/ha) (1ha = 107639 pi ²)	2200	2337	1965	2398	2220	1715	2237	2753	1774	2178
N (%)	1,86	2,78	2,35	2,38	2,97	2,64	2,84	2,19	2,43	2
Contenu en N biomasse aérienne	41	65	46	57	66	45	64	60	43	54
Apport de N potentiel (contenu en N X coeff racinaire X % relargué selon le C/N) * (kg/ha)	20	32	23	29	33	23	32	30	22	27
Apport de N probable avec incorporation (apport de N potentiel X 0,7) (kg N/ha)	14	23	16	20	23	16	22	21	15	19
Apport de N probable sans incorporation (apport de N potentiel X 0,5) (kg N/ha)	10	16	12	14	16	11	16	15	11	14

* Le coefficient racinaire est de 1,2 (mélange 1) et de 1,25 (mélange 2). Le % de N relargué est de 50 % pour les rapports C/N plus petits ou égaux à 15; de 40 % pour les rapports de 16 à 20, de 30% pour les rapports de 21 à 25, de 25% pour les rapports de 26 à 30.

Malgré des biomasses plus importantes qu'au site A (environ 2 fois plus élevées), les taux en azote y étaient plus faibles, les contenus en N y étaient donc du même ordre de grandeur qu'au site A. En effet, les valeurs calculées sont en moyenne sous 15 kg N/ha pour le mélange 1 et sous 20 kg N/ha pour le mélange 2. Les apports probables de N sont donc, ici aussi, très semblables et assez faibles par rapport à la fertilisation minérale post-semis communément utilisée (175-200 kg N/ha). Par contre, dans ce cas-ci, ces valeurs sont plutôt faibles comparées aux valeurs obtenues par l'ENM, soit 200 kg N/ha pour le mélange 1 (la valeur obtenue mathématiquement était plus élevée, mais par prudence on peut utiliser le maximum de fertilisation minérale appliquée), et 156 kg N/ha pour le mélange 2.

Tableau 12: Site D : Apport probable d'azote provenant des CC selon la méthode MERCI

	Bloc 1			Bloc 2			Bloc 3			
Mélange #1 (Quadra 17'x17' = 2 pi²)	Quadra #1	Quadra #2	Quadra #3	Quadra #1	Quadra #2	Quadra #3	Quadra #1	Quadra #2	Quadra #3	Moyenne
Poids sec (g)	30,89	42,06	48,36	27,19	52,38	35,87	34,06	54,19	59,34	
Poids sec (kg/ha) (1ha = 107639 pi²)	1 662	2 264	2 603	1 463	2 819	1 931	1 833	2 916	3 194	2 298
N (%)	1,84	1,68	2,09	1,92	1,81	1,96	2,74	2,14	2,97	
Contenu en N biomasse aérienne	31	38	54	28	51	38	50	62	95	50
Apport de N potentiel (contenu en N X coeff racinaire X % relargué selon le C/N) * (kg N/ha)	18	23	33	17	31	23	30	37	57	30
Apport de N probable avec incorporation (apport de N potentiel X 0,7) (kg N/ha)	13	16	23	12	21	16	21	26	40	21
Apport de N probable sans incorporation (apport de N potentiel X 0,5) (kg N/ha)	9	11	16	8	15	11	15	19	28	15
Mélange #2 quadra 17'x17' = 2 pi², sauf pour rep 3 - quadra 3 (1,15 pi²)										
Poids sec (g)	26,01	20,81	31,45	28,11	24,57	42,22	48,33	40,54	48,27	
Poids sec (kg/ha) (1ha = 107639 pi²)	1399,85	1119,98	1692,62	1512,87	1322,35	2272,26	2601,10	2181,84	4518,03	2 069
N (%)	1,86	2,78	2,35	2,38	2,97	2,64	2,84	2,19	2,43	
Contenu en N biomasse aérienne	26	31	40	36	39	60	74	48	110	52
Apport de N potentiel (contenu en N X coeff racinaire X % relargué selon le C/N) *	16	19	25	23	25	37	46	30	69	32
Apport de N probable avec incorporation (apport de N potentiel X 0,7) (kg N/ha)	11	14	17	16	17	26	32	21	48	23
Apport de N probable sans incorporation (apport de N potentiel X 0,5) (kg N/ha)	8	10	12	11	12	19	23	15	34	16

* Le coefficient racinaire est de 1,2 (mélange 1) et de 1,25 (mélange 2). Le % de N relargué est de 50 % pour les rapports C/N plus petits ou égaux à 15; de 40 % pour les rapports de 16 à 20, de 30% pour les rapports de 21 à 25, de 25% pour les rapports de 26 à 30.

Les poids moyens de biomasse mesurés à la fin de l'automne au site D sont très similaires à ceux du site C et ainsi les apports potentiels de N calculés par la méthode MERCI sont assez faibles également, soit moins de 50, et en moyenne moins de 25 kg N/ha, et ce, pour

les 2 mélanges. Les données de rendements et les ENM étaient effectivement nulles, sauf pour 2 cas, soit pour le mélange 1 incorporé au printemps, et le mélange 2 non-incorporé.

Tableau 13: Résumé des apports de N aux trois sites selon les différentes méthodes

Mélange	Méthode	SITE A					SITE C					SITE D				
		Biomasse CC moyenne (kg/ha)	C/N moyen	APA (kg/ha)	MERCI (kg/ha)	ENM (kg/ha)	Biomasse CC moyenne (kg/ha)	C/N moyen	APA (kg/ha)	MERCI (kg/ha)	ENM (kg/ha)	Biomasse CC moyenne (kg/ha)	C/N moyen	APA (kg/ha)	MERCI (kg/ha)	ENM (kg/ha)
1 CC	Incorporé à l'automne				13	0				13	192			21	0	
	Incorporé au printemps	1033	15*	30	13	0	2071	21	45	13	280	2298	15	50	21	53
	Non-incorporé (semis-direct)				9	13				10	288			15	0	
2 CCL	Incorporé à l'automne				16	0				19	79			23	0	
	Incorporé au printemps	1142	15*	37	16	18	2178	17	54	19	194	2069	15	52	23	0
	Non-incorporé (semis-direct)				11	0				14	195			16	208	

* Ce résultat n'avait pas été fourni par le laboratoire d'analyse, il a été calculé en fonction des espèces présentes.

La méthode de l'ENM n'a pas fourni des résultats plus concluants en fonction du moment (ou de l'absence) de l'incorporation des CC. Pour 1 des sites, l'ENM était nul dans tous les cas, à un autre site, l'ENM était supérieur dans les bandes non-incorporées, et à l'autre site, l'ENM est plus élevé quand les CC est incorporé au printemps ou alors non-incorporé (ces 2 options étaient similaires).

Aucun effet n'a été observé en fonction du mélange, avec ou sans légumineuse. Dans tous les cas, les biomasses totales étaient assez similaires; Site A 1033 kg/ha pour le mélange 1 (sans légumineuse), et 1142 kg/ha pour le mélange 2 (sans légumineuse), ce qui représente 10 % de plus. Pour le site C, la biomasse est 5% plus importante avec le mélange 2, et au site D, la biomasse est 10 % plus importante avec le mélange 1. Il serait intéressant de calculer la biomasse de chacune des espèces, plutôt que pour toutes les espèces confondues.

Bref, les méthodes basées sur la biomasse et les analyses chimiques ont eu tendance à un peu surestimer ou beaucoup sous-estimer les résultats de l'ENM. On remarque une forte variation des résultats des différentes méthodes d'un site à l'autre. Plusieurs facteurs pédologiques entrent donc en jeu pour expliquer la dynamique et le recyclage de l'azote par les plantes, dont les plus importants sont probablement le pH, le carbone labile, les rotations, l'humidité, et l'aération. Le pH est sans doute le facteur qui influence le plus l'activité microbienne liée à la minéralisation de N dans le sol, il s'agit donc d'un critère important à considérer. Culman et coll. (2013) ont également conclu que la minéralisation du N varie dans le sol de la même manière que le carbone labile. Ce carbone labile varie en partie selon les régies de cultures, mais surtout selon les rotations. Dans les champs étudiés par les auteurs, le C labile était corrélé au rendement. La dynamique de l'azote est donc fortement influencée par le pH, le C labile et la respiration microbienne. Cette dernière est favorisée par certaines conditions abiotiques (disponibilité des nutriments, température, humidité et oxygénation), par les autres organismes du sol, et par la régie de culture (travail de sol, couverture de sol, engrais de synthèse, rotations).

DIFFUSION DES RÉSULTATS

La présentation des résultats s'est effectuée le 28 février 2022, suivant l'analyse des données des sites C et D. En effet, suite à la deuxième année du projet nous n'avions que des résultats pour 1 site, et la gestion des données des 2 autres sites s'est terminée à l'hiver 2022. La présentation s'est faite par webinaire, offert gratuitement et ouvert à tous.

L'évènement a été annoncé aux membres, clients et tous les autres partenaires du Groupe ProConseil, ainsi que sur la page Facebook. Le webinaire a été enregistré et la vidéo a été partagée à tous ceux qui avaient reçu l'invitation et ceux qui ont participé. 40 personnes étaient présentes, dont 28 producteurs.

APPLICATIONS POSSIBLES POUR L'INDUSTRIE

Ce projet a permis de démontrer qu'avec les bonnes conditions, les cultures de couverture peuvent représenter un apport d'azote important pour la culture suivante de maïs grain, jusqu'à potentiellement remplacer totalement la fertilisation minérale post-semis. Plusieurs facteurs de cette équation demeurent toutefois encore inconnus. D'un point de vue agronomique, il peut être avantageux de réduire les apports d'engrais minéral en misant sur une bonne gestion des sols et une implantation de CC, surtout dans un contexte d'augmentation considérable des prix de l'engrais.

Il est toutefois possible de conclure que pour favoriser une bonne nutrition azotée, il faut : favoriser une rotation de cultures avec une diversité d'espèces et de couverts végétaux; préserver la structure du sol; nourrir le sol avec engrais organiques diversifiés et utiliser avec parcimonie les engrais minéraux.

Il semble pertinent aussi de continuer à miser sur les tests de nitrates du sol en post-levée du maïs, couplée à une gestion en fractionnement de l'azote minéral. Ces tests servent « à évaluer le contenu en nitrate du sol au moment où l'échantillon est prélevé » et « sont utiles dans les champs ayant un historique de fumiers ou de lisiers » (CRAAQ, 2010). En obtenant le contenu en nitrate du sol, il est alors possible d'ajuster et d'adapter la quantité de N à appliquer au maïs en post-levée, et ainsi avoir une meilleure évaluation de l'apport des cultures de couverture.

POINT DE CONTACT POUR INFORMATION

Catherine Mercier, M.Sc, chargée de projets en agroenvironnement.
450 864-0180 poste 114, cellulaire 514 772-3644
catherine.mercier@groupeproconseil.com

REMERCIEMENTS AUX PARTENAIRES FINANCIERS

Ce projet a été réalisé dans le cadre du sous-volet 3.1 du programme Prime-Vert –Approche régionale – avec une aide financière du ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation.

Merci aux producteurs participants.

Merci à Marc Richard de ECO+ inc.pour le fertilisant azoté minéral.

RÉFÉRENCES

CRAAQ. 2010. *Guide de référence en fertilisation, 2e édition*. Québec, Québec.

Culman, S. W., Snapp, S. S., Green, J. M., & Gentry, L. E. 2013. *Short-and long-term labile soil carbon and nitrogen dynamics reflect management and predict corn agronomic performance*. *Agronomy Journal*, 105(2), 493-502.

Joseph, Claude-Alla. 2014. La disponibilité de l'azote dans les matières résiduelles fertilisantes (MRF) valorisées en agriculture. Université d'État d'Haïti et Université Laval. [https://akosaa.fsaa.ulaval.ca/fileadmin/Fichiers/Ressources/Memoires/Memoires_Leaders_FSAA/memoire_Claude_Alla_Joseph.pdf]

Verville, Frédéric. 2014. Effet des engrais verts et de leur période d'enfouissement sur la nutrition azotée et les rendements du blé, Université Laval, Québec, Canada. [<https://corpus.ulaval.ca/jspui/bitstream/20.500.11794/27289/1/31303.pdf>]

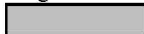
ANNEXES

Annexe 1 :

Dispositif implanté aux sites A et B au cours de la saison 2019 et implanté au sites C au cours de la saison 2020.

Zone tampon	Répétition 1						Témoin	Répétition 2						Témoin	Répétition 3						Témoin	Zone tampon
	Mélange 1			Mélange 2				Mélange 1			Mélange 2				Mélange 1			Mélange 2				
	Aut	Pr	SD	Aut	Pr	SD		Aut	Pr	SD	Aut	Pr	SD		Aut	Pr	SD	Aut	Pr	SD		
X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X				
X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X				
X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X				

Légende:

 Zones où le maïs sera fertilisé selon la régie normale du producteur (sauf pour les parcelles X)

X: parcelles où le maïs ne sera pas fertilisé en post-levé

Mélange 1: Mélange de CC sans légumineuse: avoine et pois Daikon

Mélange 2: Mélange de CC avec légumineuse: pois, avoine et radis Daikon

Aut: Zone de CC incorporé à l'automne *Ou au début du printemps

Pr: Zone de CC incorporé au printemps *Ou très tardivement au printemps

Témoin: Zones de maïs sans CC où sera établi un dispositif de parcelles d'azote (courbe de réponse du maïs) (Le dispositif sera installé dans un des trois témoins.)

1.2 Dispositif prévu pour établir la courbe de réponse du maïs à l'azote (saison 2020)

Bloc 1	Bloc 2	Bloc 3	Bloc 4
T1	T4	T2	T3
T3	T2	T1	T5
T4	T1	T5	T2
T2	T5	T3	T4
T5	T3	T4	T1

Légende:

T1: Traitement démarreur seul

T2: Traitement démarreur + 50 kg de N/ha

T3: Traitement démarreur + 100 kg de N/ha

T4: Traitement démarreur + 150 kg de N/ha

T5: Traitement démarreur + 200 kg de N/ha

Annexe 2 : Dispositif implanté au site C au cours de la saison 2020

	Bloc 1				Témoin 20 m	Bloc 2				Témoin 20 m	Bloc 3				Témoin 20 m
	Mélange 1		Mélange 2			Mélange 1		Mélange 2			Mélange 1		Mélange 2		
60 m de long	Aut	Pr	Au _t	Pr	Au _t	Pr	Au _t	Pr	Au _t	Pr	Au _t	Pr			
	5m X	4m X	5m X	4m X	5m X	4m X	5m X	4m X	5m X	4m X	5m X	4m X			
30 m de long	Semi-direct		Semi-direct		Semi-direct		Semi-direct		Semi-direct		Semi-direct				
	9 m X		9 m X		9 m X		9 m X		9 m X		9 m X				

Légende :

X : Zones où le maïs sera fertilisé selon la régie normale du producteur, sauf pour 3 parcelles qui ne seront pas fertilisé en post-levée

Mélange 1 : Mélange de CC sans légumineuse : blé et radis daïkon

Mélange 2 : Mélange de CC avec légumineuse : blé, radis daïkon et pois

Aut : Zone de CC incorporée à l'automne de l'année de leur implantation

Pr : Zone de CC incorporée au printemps suivant

Témoin : Zones de maïs sans CC où sera établi un dispositif de parcelles de différentes doses d'azote (courbe de réponse du maïs)

Annexe 3 : Photos des différentes étapes et des CC

3.1 Photos du Site A :

Site après la récolte



Équipement de semis des CC



Mélange 1 des CC



Mélange 1 des CC



Mélange 1 vs zone témoin



Mélange 1



Mélange 1 vs mélange 2



Mélange 2



Mélange 2



3.2 : Photos des sites C et D

Quadra au site C – Mélange 1



Quadra au site C – Mélange 2



Quadra au site D – Mélange 1



Quadra au site D – Mélange 2

