

IMPACT AGRONOMIQUE ET ÉCONOMIQUE

DES LÉGUMINEUSES

DANS LES ROTATIONS AGRICOLES



RAPPORT DE RECHERCHE

Demandeur : Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA)

Chercheurs : Adrien N'Dayegamiye¹, Gilles Tremblay² et Anne Drapeau¹

Date de rapport final : Janvier 2014

1

irda INSTITUT DE RECHERCHE
ET DE DÉVELOPPEMENT
EN AGROENVIRONNEMENT

2


Centre de recherche sur les grains inc.

CDAAQ CONSEIL POUR
LE DÉVELOPPEMENT DE
L'AGRICULTURE DU QUÉBEC
FINANCÉ PAR :
 Agriculture et
Agroalimentaire Canada  Agriculture and
Agri-Food Canada  Canada

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES TABLEAUX	i
LISTE DES FIGURES.....	ii
RÉSUMÉ	1
1 - PROBLÉMATIQUE DE L'AZOTE.....	1
2 - MÉTHODOLOGIE EXPÉRIMENTALE	2
2.1 dispositif expérimental	2
2.2 analyse économique	3
2.3 analyses statistiques	3
3 - RÉSULTATS	4
3.1 Quantités de biomasses et d'azote incorporées au sol	4
3.2 Effets sur les propriétés du sol.....	4
3.2.1 Structure du sol.....	4
3.2.2 Activités enzymatiques du sol et teneurs en nitrates	8
3.3 Les rendements en blé et maïs-grain à Saint-Lambert-de-Lauzon	11
3.4 Les rendements en blé et en maïs à Saint-Mathieu-de-Beloeil.....	12
3.5 Les équivalents en engrais azoté.....	13
3.6 Doses économiques.....	15
3.7 Bénéfices économiques	18
4 - CONCLUSION	20

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1.	4
Quantités de biomasse sèche et d'azote apportées au sol par les légumineuses seules ou en association avec le maïs ou le blé.	
TABLEAU 2.	5
Analyse de variance de l'effet des précédents de culture sur les proportions d'agrégats du sol et le diamètre moyen pondéré des agrégats à Saint-Mathieu-de-Beloeil (2012).	
TABLEAU 3.	7
Analyse de variance de l'effet des précédents de culture sur les proportions d'agrégats du sol et le diamètre moyen pondéré des agrégats à Saint-Lambert-de-Lauzon (2012).	
TABLEAU 4.	9
Analyse de variance des effets des précédents de culture sur les teneurs en nitrates en pré-semis et en post-levée, et sur les activités enzymatiques du sol (Saint-Mathieu-de-Beloeil, 2012).	
TABLEAU 5.	10
Analyse de variance des effets des précédents de culture sur les teneurs en nitrates en pré-semis et en post-levée, et sur les activités enzymatiques du sol (Saint-Lambert-de-Lauzon, 2012).	
TABLEAU 6.	11
Rendements en blé et en maïs-grain selon les différents précédents de légumineuses (Saint-Lambert-de-Lauzon, 2012).	
TABLEAU 7.	12
Rendements en blé et maïs-grain selon les différents précédents de légumineuses (Saint-Mathieu-de-Beloeil, 2012).	
TABLEAU 8.	13
Effet des légumineuses et engrais azotés sur le rendement du maïs et du blé, sites de Saint-Mathieu-de-Beloeil et Saint-Lambert-de-Lauzon.	
TABLEAU 9.	16
Rendements maximum de maïs-grain et doses économiques, selon les précédents de légumineuses (Saint-Mathieu-de-Beloeil, 2012).	
TABLEAU 10.	17
Rendements maximum de blé et doses économiques, selon les précédents de légumineuses (Saint-Mathieu-de-Beloeil, 2012).	
TABLEAU 11.	18
Revenus bruts, coûts variables et revenus nets à l'hectare des cultures de blé et maïs-grain selon les précédents culturaux à Saint-Mathieu-de-Beloeil (2011 et 2012).	
TABLEAU 12.	19
Revenus bruts, coûts variables et revenus nets à l'hectare des cultures de blé et maïs-grain selon les précédents culturaux à Saint-Lambert-de-Lauzon (2011 et 2012).	

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1.....	13
Contribution en azote des légumineuses pour la culture de blé, site Saint-Mathieu-de-Beloeil (2012).	
FIGURE 2.....	14
Contribution en azote des légumineuses pour la culture de maïs, site Saint-Mathieu (2012).	
FIGURE 3.....	14
Contribution en azote des légumineuses pour la culture de blé, site Saint-Lambert-de-Lauzon (2012).	
FIGURE 4.....	15
Contribution des légumineuses en azote pour la culture de maïs, site Saint-Lambert-de-Lauzon (2012).	



RÉSUMÉ

La contribution réelle des légumineuses aux rendements et à la nutrition azotée des cultures suivantes n'est pas bien connue. Cette étude, située à St Lambert-de-Lauzon et à St Mathieu-de-Beloeil, a débuté en 2011 afin de déterminer les bénéfices agronomiques des légumineuses cultivées seules ou en association avec le blé ou le maïs. Les légumineuses semées seules en 2011 étaient le soya, le haricot sec, le pois sec, la vesce velue, la luzerne et le trèfle incarnat. La vesce velue, le trèfle incarnat et le pois fourrager ont été semés en association avec le blé, alors que la luzerne, le trèfle incarnat et la vesce velue ont été semés en intercalaire avec le maïs grain. Des cultures de maïs grain et de blé, qui ne sont pas fixatrices d'azote, ont été semées seules comme témoins pour évaluer la contribution en azote des légumineuses. En 2012, des doses croissantes d'engrais azoté ont été appliquées au blé panifiable et au maïs grain, soit 0, 50, 100, 150 et 200 kg/ha pour le maïs et 0, 20, 40, 60 et 80 kg /ha pour le blé. Les quantités de biomasses végétales et d'azote retournées au sol en 2011 étaient très importantes pour certaines cultures (vesce velue, luzerne annuelle et blé/vesce), variant entre 2,5 et 6 t/ha de matière sèche et entre 60 et 131 kg N/ha d'azote. En comparaison avec le précédent sans légumineuse, les sols avec les différentes légumineuses ont permis des augmentations de 600 à 1000 kg grains/ha de blé et de 1,3 à 3,2 t/ha de maïs. Les équivalents en engrais azoté ou le remplacement de l'engrais azoté ont varié entre 10 et 80 kg N/ha pour le blé et entre 12 et 65 kg N/ha pour le maïs. La disponibilité de l'azote des légumineuses pour les cultures suivantes (blé et maïs-grain) a été plus élevée à St Mathieu-de-Beloeil qu'à St Lambert-de-Lauzon. Par conséquent, des doses plus faibles d'engrais azotés (doses économiques : 123 à 149 kg N/ha) sous les précédents de luzerne, vesce velue, trèfle, et blé/vesce ont permis d'obtenir des rendements maximum de maïs et de blé. Les cultures de légumineuses ont rapidement augmenté les macro-agrégats du sol supérieurs à 5 mm de diamètre, et augmenté les teneurs en nitrates ainsi que les activités biologiques et enzymatiques des sols étudiés. Les effets des légumineuses sur l'amélioration des conditions du sol ont été plus élevés pour la vesce velue, la luzerne et le mélange blé/vesce, et ceci est attribuable aux grandes quantités de biomasses incorporées sous ces précédents de culture. À court terme, les revenus nets ont été faibles pour ces légumineuses cultivées seules, à cause du manque de récoltes en 2011. Cependant, ces précédents de légumineuses ont amélioré de façon significative les propriétés du sol, ainsi que les rendements des cultures subséquentes, ce qui signifie que ces systèmes pourraient accroître les gains à moyen terme. De façon générale, les équivalents en engrais azoté ainsi que les rendements du blé et du maïs ont été les plus élevés selon l'ordre suivant : vesce velue > luzerne annuelle > mélange blé/vesce > maïs/vesce, trèfle incarnat > soya. Les effets de ces différentes légumineuses sur les niveaux de rendements du blé et du maïs et sur l'amélioration des propriétés du sol ont été en général plus importants au site de St Mathieu, ce qui suggère que les conditions climatiques plus chaudes dans cette région ont permis une décomposition plus rapide des biomasses de légumineuses enfouies au sol, et par conséquent une amélioration des conditions du sol et une valorisation efficace de l'azote des légumineuses par les cultures suivantes. Malgré les conditions climatiques peu favorables en 2011 et 2012 pour la croissance des cultures, cette étude a démontré que l'introduction de légumineuses dans les rotations pourrait être très bénéfique.

1. PROBLÉMATIQUE DE L'AZOTE

La gestion de l'azote constitue un enjeu important pour les productions végétales. Selon les experts de la FAO, plus de 12,5 millions de tonnes de fertilisants azotés sont utilisés annuellement pour la production de maïs à travers le monde. Au Québec, c'est environ 90 000 tonnes d'engrais azotés qui sont annuellement utilisés seulement dans les cultures de maïs, de pommes de terre et de céréales. À cause de l'augmentation constante du prix de cet engrais, l'azote est devenu un élément important du coût de production du maïs ou d'autres cultures. Dans le monde, la fixation biologique annuelle d'azote par les légumineuses est évaluée entre 75 et 80 millions de tonnes d'azote, la moitié de ces quantités se retrouvant dans les sols sous prairie. Au niveau des productions végétales mondiales, 40 % des besoins en azote des cultures sont ainsi comblés par les légumineuses qui fixent l'azote de l'atmosphère, et 60 % par les engrais minéraux.

Les superficies sous culture de légumineuses (soya, haricot, pois et gourgane) sont en constante expansion au Québec. D'autres espèces sont également en voie d'introduction, dans le cadre du programme de diversification des cultures du MAPAQ. Il s'agit du lupin, du pois chiche, de la lentille et de la vesce. Plusieurs de ces espèces de légumineuses présentent un bon potentiel de croissance et de fixation de l'azote de l'atmosphère, cependant les quantités d'azote fixées vont dépendre fortement des conditions de sol et de climat du Québec.

L'augmentation de légumineuses dans les rotations agricoles pourrait enrichir les sols en azote et permettre ainsi des réductions importantes d'apports d'engrais azotés, tout en maintenant la productivité des sols et la rentabilité des productions agricoles.

Cette étude visait à connaître les effets de diverses légumineuses sur les rendements du blé et du maïs, sur les doses économiques des engrais azotés pour ces cultures et sur les changements des propriétés du sol. L'étude a également évalué les revenus nets obtenus selon les différentes cultures de rotations étudiées.

2. MÉTHODOLOGIE EXPÉRIMENTALE

2.1. DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

Les conditions climatiques influencent autant la croissance des légumineuses, leur potentiel de fixation biologique d'azote ainsi que l'utilisation de cet élément par les cultures subséquentes. Par conséquent, les essais ont été établis en 2011 dans deux régions distinctes ayant des conditions climatiques différentes. Le premier essai a été établi à la ferme expérimentale de l'IRDA à St-Lambert de Lauzon sur un loam de la série Le Bras. Le second site de l'étude était situé à la station de recherche du CEROM (St Mathieu- de- Beloëil), sur un sol de la série St-Urbain.

Cette étude a comparé 14 rotations de cultures, dont douze légumineuses cultivées seules ou en association ou en intercalaire avec le blé ou le maïs. Les légumineuses semées seules étaient le soya, le haricot sec, le pois sec, la vesce velue, la luzerne et le trèfle incarnat. La vesce velue, le trèfle incarnat et le pois ont aussi été semés en association avec le blé, alors que la luzerne, le trèfle incarnat et la vesce velue ont été semés en intercalaire avec le maïs grain. Des cultures de maïs grain et de blé, qui ne sont pas fixatrices d'azote, ont été semées seules afin d'être utilisées comme témoins pour évaluer la contribution en azote des légumineuses.

Pour les légumineuses à grains (soya, pois et haricot), les rendements en grains et les résidus organiques ont été déterminés au moment de la récolte. Les résidus de récolte de ces légumineuses ont été laissés au champ et par la suite incorporés au sol à l'aide d'une herse à disques. Dans le traitement de légumineuses associées à la culture de blé (la vesce et le pois), la récolte de la biomasse végétative a été effectuée au mois d'août au stade laitieux du blé, et enfouie également avec une herse à disques.

Dans le traitement de blé en association avec le trèfle incarnat, le blé a été récolté à la maturité. La croissance du trèfle s'est poursuivie jusqu'au début octobre et sa biomasse a été incorporée au sol par labour superficiel. Pour le trèfle incarnat, la luzerne et la vesce semés seuls, la récolte a été effectuée en fin septembre à St-Lambert, alors qu'à St-Mathieu de Beloëil, la biomasse aérienne totale enfouie, comprenait un fauchage de mi-saison et la biomasse produite par le regain en fin de saison. Les biomasses végétales ont été incorporées au sol avec une herse à disques. Les biomasses du trèfle incarnat et de la vesce semés entre les rangs du maïs ont été récoltées au mois d'octobre et incorporées au sol par labour.

Des échantillons de résidus de récolte et de biomasses végétatives ont été prélevés au moment de la récolte selon les cultures afin de déterminer leur teneur en matière sèche et en azote. Ces paramètres étaient nécessaires pour calculer les quantités d'azote fixées de l'air et incorporés au sol.

Pour déterminer la contribution en azote des légumineuses enfouies au sol en 2011, les cultures de blé panifiable et de maïs grain ont été semées en 2012 sous ces précédents de culture. Les parcelles des quatorze précédents culturaux ont été subdivisées afin de mesurer la contribution des légumineuses sur la nutrition azotée du blé et du maïs grain. Chacune de ces deux cultures a reçu des doses croissantes d'azote, soit : 0, 20, 40, 60, 80 kg N/ha pour le blé et 0, 50, 100, 150, et 200 kg N/ha pour le maïs grain. L'azote a été appliqué sous forme de nitrate d'ammonium calcique au moment du semis. Les doses de phosphore et de potassium appliquées ont été déterminées selon les besoins de chaque culture. Les rendements de ces cultures, leurs teneurs en matière sèche, en azote et les prélèvements en azote des grains et des pailles ont été déterminés pour chaque traitement.

Afin d'évaluer les effets des différents précédents de culture sur les changements des propriétés du sol, plusieurs paramètres ont été analysés en 2012, soient les teneurs en carbone et en N total en pré-semis, les teneurs en nitrates au semis (PPNT) et au stade de 5 à 6 feuilles du maïs (PSNT), ainsi que les activités enzymatiques (uréase, phosphatase acide et alcaline, et déshydrogénase), les proportions et la stabilité des agrégats ainsi que la densité apparente.

2.2. ANALYSE ÉCONOMIQUE

La méthodologie du calcul économique utilisée a été celle du budget d'exploitation à l'hectare. Elle réalise les marges comme s'il s'agissait de celles d'une entreprise agricole. Elle est inspirée des Références économiques du Centre de Référence en Agriculture et Agroalimentaire du Québec (CRAAQ). Cette méthode consiste à soustraire les coûts variables des produits à l'hectare (revenus bruts) pour obtenir une marge sur les coûts variables à l'hectare (revenus nets).

Les produits étaient composés des ventes de grains, de pailles et des compensations de l'assurance stabilisation des revenus agricoles (ASRA). Les ventes de grains ont été réalisées aux prix du marché du programme d'assurance stabilisation des revenus de la Financière agricole du Québec pour l'année considérée ainsi que les compensations d'assurance stabilisation.

Les coûts variables se décomposaient en coûts d'approvisionnements, d'opérations culturales, de mise en marché et d'autres coûts à l'hectare. Les coûts d'approvisionnements comprenaient les frais pour les semences, fertilisants, pierre à chaux et pesticides. Les coûts des opérations culturales étaient constitués des coûts variables des machineries agricoles utilisées pour labourer, herser, semer, pulvériser, récolter et sécher le maïs-grain. Les coûts des opérations culturales étaient des moyennes de coût aux agriculteurs pour l'opération concernée. Ces coûts ont été tirés de l'Agdex 740/825 des Références économiques pour l'année considérée. Ces coûts variables de machinerie comprenaient également les frais d'entretien et de réparations de la machinerie aratoire et du tracteur (utilisation 500 heures par an). Les coûts du carburant diesel (1,00 \$ le litre) et des lubrifiants (+15 % des coûts des carburants) ont aussi été ajoutés aux coûts variables. Les coûts de mise en marché étaient ceux du séchage du maïs-grain à la ferme (coûts du gaz propane et de l'électricité avec un peu d'entretien du séchoir). La différence entre la valeur des produits et les coûts variables a ainsi donné la marge sur les coûts variables à l'hectare (revenus nets).

2.3. ANALYSES STATISTIQUES

Le dispositif expérimental utilisé pour l'essai de 2012 était un split-plot avec les différents précédents de légumineuses en grandes parcelles et les différentes doses d'azote en micro-parcelles. L'analyse de la variance PROC MIX de SAS a été effectuée afin de déterminer les effets des précédents de culture, de l'apport d'engrais azoté et leur interaction sur les rendements du blé et du maïs, ainsi que sur les propriétés du sol. Les analyses de régression ont permis de calculer les rendements maximum du blé et du maïs-grain ainsi que les doses économiques de l'engrais azoté sous les différents précédents des cultures étudiés.



3. RÉSULTATS

3.1. QUANTITÉS DE BIOMASSES ET D'AZOTE INCORPORÉES AU SOL

Les résultats obtenus montrent que les quantités d'azote fixées par les légumineuses et apportées au sol sont importantes, et elles sont reliées aux biomasses végétales produites par chaque espèce de légumineuse (Tableau 1). Dans les deux sites étudiés, les légumineuses cultivées seules comme engrais verts, ou associées au blé ont produit des quantités plus élevées de biomasses végétales et apporté au sol de quantités plus importantes d'azote. En comparaison, les légumineuses associées au maïs ou en intercalaires ont donné de plus faibles rendements en biomasses et de faibles gains en azote. Pour les légumineuses dont on avait récolté le grain (soya, pois sec et haricot), les résidus de récolte ont varié de 0,6 à 2,9 t/ha et les quantités d'azote incorporées au sol variaient de 10 à 40 kg N/ha.

Tableau 1 : Quantités de biomasse sèche et d'azote apportées au sol par les légumineuses seules ou en association avec le maïs ou le blé.

Légumineuses	Biomasse (t m.s./ha)		Quantités d'azote (kg N/ha)	
	St-Lambert	CEROM	St-Lambert	CEROM
Haricot sec	1,4	0,6	40	9
Soya	2,0	2,9	10	23
Pois sec	2,9	1,0	35	n.d.
Vesce velue	3,5	2,8	106	60
Trèfle incarnat	3,7	2,6	59	59
Luzerne	1,8	4,4	52	131
Maïs/vesce velue	0,4	2,5	13	66
Maïs/luzerne	0,2	1,2	5	28
Maïs/trèfle incarnat	0,5	0,7	9	12
Blé/vesce velue	5,9	5,8	107	121
Blé/trèfle incarnat	2,9	3,0	21	13
Blé/pois fourrager	5,9	3,9	116	18

Dans les deux sites étudiés, un bon potentiel de fixation d'azote (>50 kg/ha) a été obtenu avec la vesce velue, le trèfle incarnat et la luzerne cultivés seuls. Pour les légumineuses associées au blé, c'est la vesce velue et le pois fourrager qui ont apporté au sol de quantités élevées d'azote. Le trèfle incarnat a fourni de faibles quantités d'azote dans les deux sites étudiés (13-21 kg N/ha).

À l'exception de la vesce velue cultivée sur le site du CEROM, les légumineuses en intercalaires avec le maïs n'ont pas été performantes quant à la production de biomasses végétales (0,2-1,2 t/ha) et à l'apport d'azote au sol, ceci étant attribuable à la compétition avec le maïs pour l'eau ou pour la lumière. Ces résultats ont déjà été obtenus dans plusieurs autres études et dans différentes conditions climatiques. Cette régie de légumineuse en intercalaire avec le maïs n'est pas donc recommandable.

3.2. EFFETS SUR LES PROPRIÉTÉS DU SOL

3.2.1. STRUCTURE DU SOL

Les résultats obtenus à St Mathieu-de-Beloeil et à St Lambert-de-Lauzon indiquent que les différents systèmes de rotation n'ont pas significativement accru les contenus en C et en N total des sols, ni amélioré la densité des sols (données non présentées). Ces paramètres évoluent lentement dans les sols, et des effets significatifs sont généralement observés à moyen et

long terme suite aux apports de fumiers ou de biomasses végétales. Toutefois, les incorporations de biomasses de différentes légumineuses ont rapidement augmenté les activités biologiques et enzymatiques, et amélioré la structure du sol (Tableaux 2 à 5).

Au site de Saint-Mathieu-de-Beloil, les applications des biomasses de différentes légumineuses ont significativement augmenté les agrégats du sol supérieurs à 5mm de diamètre, ainsi que le diamètre moyen pondéré (DMP) des agrégats, en comparaison avec le blé comme témoin sans légumineuse. Ces effets ont été différents selon les précédents de culture.

Ainsi, les légumineuses à grains (pois, soya et haricot) qui ont laissé de plus faibles résidus organiques après leur récolte (Tableau 1) n'ont pas significativement accru les macro-agrégats du sol ni le DMP en comparaison avec le blé comme précédent sans légumineuse. (Tableau 2). Malgré les quantités élevées de biomasses incorporées au sol, les effets des précédents de blé/légumineuses et de maïs/légumineuses sur les macro-agrégats et le DMP n'ont pas été non plus significatifs. Les effets les plus importants sur la proportion des agrégats supérieurs à 5 mm de diamètre et sur le DMP des agrégats ont été obtenus seulement avec la luzerne, la vesce velue et le trèfle incarnat. Ces légumineuses ont accru de 30% ces macro-agrégats du sol, en comparaison avec le sol témoin sans légumineuse. Cette action rapide de ces espèces de légumineuses sur la structure est probablement reliée aux quantités élevées de biomasses incorporées au sol (Tableau 1) et à leur décomposition.

Tableau 2. Analyse de variance de l'effet des précédents de culture sur les proportions d'agrégats du sol et le diamètre moyen pondéré des agrégats à Saint-Mathieu-de-Beloil (2012).

Précédent de culture	>5 mm	5-2 mm	2-1 mm	1-0,25 mm	DMP
	----- (%) -----				(mm)
1) Sans légumineuse	30,87	32,02	14,28	8,74	3,40
2) Pois sec	35,83	29,33	11,66	7,56	3,44
3) Haricot sec	31,60	27,23	12,13	7,71	3,89
4) Soya	38,93	32,27	15,55	8,90	3,30
5) Luzerne	39,9	32,10	14,13	10,22	3,84
6) Vesce velue	42,90	31,83	13,70	8,35	3,71
7) Trèfle incarnat	39,47	29,50	12,70	8,78	3,74
8) Blé/trèfle incarnat	27,10	31,40	14,97	9,50	3,15
9) Blé/poisfourrager	34,73	30,33	12,87	7,57	3,56
10) Blé/vesce velue	39,63	35,23	15,10	6,82	3,93
11) Maïs/trèfle incarnat	38,90	28,07	10,60	6,89	3,72
12) Maïs/luzerne	32,77	30,00	14,17	8,78	3,45
13) Maïs/vesce velue	34,17	29,50	14,40	8,55	3,52
Analyse de variance	Valeur de F (Pr >F)				
Effet précédent	3,32*	0,57	0,41	0,42	3,57*
Contrastes					
1 versus autres	5,42*	1,01	0,46	0,39	3,41*
1 versus 2, 3 et 4	1,07	1,03	0,18	0,29	0,98
1 versus 5, 6 et 7	4,74*	0,43	0,05	0,28	4,47*
1 versus 8, 9 et 10	1,53	0,33	0,72	1,03	0,73
1 versus 11, 12 et 13	1,17	1,40	0,54	0,49	0,90
2, 3 et 4 versus 5, 6 et 7	6,45*	0,69	0,15	0,60	3,39*
5, 6 et 7 versus 8,9 et 10	4,46*	0,07	0,74	1,41	2,43*
5, 6 et 7 versus 11, 12 et 13	3,48*	1,09	0,56	1,98	5,63*
8, 9 et 10 versus 11, 12 et 13	0,51	1,04	0,25	0,64	1,00

* significatif à P < 0,05

La somme des macro-agrégats supérieurs à 0,25mm de diamètre était très élevée dans le sol étudié, variant entre 78 à 97% des agrégats du sol. Même si le sol de la série St Urbain possède généralement une très bonne structure, plusieurs des précédents de légumineuses étudiés (soya, luzerne, vesce velue et blé/vesce) avaient les proportions les plus élevées de macro-agrégats >0,25 mm (95-97%).

Sur le site de St Lambert-de- Lauzon situé sur un loam limoneux de la série Le Bras, les légumineuses n'ont pas significativement augmenté les proportions de macro-agrégats du sol ainsi que le DMP des agrégats, en comparaison avec le sol sans légumineuse (Tableau 3). Les précédents de soya, de luzerne, vesce velue, trèfle incarnat et blé/vesce ont accru de 30% les macro-agrégats supérieurs à 5mm de diamètre, en comparaison avec le témoin sans céréale, cependant ces effets n'ont pas été significatifs au seuil de $P < 0,05$. Sur ce type de sol, la somme des agrégats a varié de 52 à 71% selon les précédents de culture, étant inférieure à celle de la série St Urbain (78 à 97%). Comme pour la série St Urbain, la somme des macro-agrégats sur la série Le Bras était plus élevée pour la luzerne, la vesce velue et le mélange blé/vesce (68-71%).

Les résultats obtenus démontrent que les effets des légumineuses sur la formation de macro- agrégats et sur le DMP pourraient être reliés au type de sol. Contrairement au sol de la série Le Bras, les applications de biomasses de différentes légumineuses ont significativement augmenté les agrégats supérieurs à 5 mm de diamètre, ainsi que le diamètre moyen pondéré des agrégats du sol de la série St Urbain. Les effets rapides des biomasses de différentes légumineuses sur la formation de macro-agrégats de ce type de sol et leur stabilité pourraient être aussi reliés au taux de décomposition des biomasses de légumineuses incorporées. Grâce aux conditions climatiques plus chaudes, la décomposition plus rapide des biomasses sur le site de St Mathieu-de-Beloeil a probablement favorisé une formation rapide de macro-agrégats. Dans le processus d'agrégation du sol, de petits agrégats sont unis ensemble grâce aux mucilages fongiques, aux exsudats bactériens, ainsi qu'aux polysaccharides dérivés de la décomposition de biomasses végétales, formant ainsi de plus gros agrégats. Cependant, cette agrégation est de courte durée, car le carbone de ces substances d'agrégation se décompose rapidement, réduisant ainsi les agrégats formés. Un apport fréquent de biomasses végétales est donc nécessaire pour obtenir des agrégats et une structure stable du sol.

Tableau 3. Analyse de variance de l'effet des précédents de culture sur les proportions d'agrégats du sol et le diamètre moyen pondéré des agrégats à Saint-Lambert-de-Lauzon (2012).

Précédent de culture	>5 mm	5-2 mm	2-1 mm	1-0,25 mm	DMP
	----- (%) -----				(mm)
1) Sans légumineuse	13,13	24,80	12,00	10,12	1,96
2) Pois sec	14,75	25,65	10,37	7,83	2,04
3) Haricot sec	13,76	24,25	11,25	10,08	1,97
4) Soya	11,48	27,35	13,55	9,93	1,97
5) Luzerne	17,46	29,10	12,09	9,39	2,46
6) Vesce velue	18,54	33,40	10,30	9,20	2,92
7) Trèfle incarnat	12,55	25,00	11,50	10,86	1,94
8) Blé/trèfle incarnat	11,05	24,65	12,19	9,65	1,83
9) Blé/pois fourrager	14,65	24,90	10,50	8,62	2,03
10) Blé/vesce velue	19,55	29,60	11,39	10,39	2,17
11) Maïs/trèfle incarnat	10,16	27,25	12,75	14,00	1,90
12) Maïs/luzerne	12,23	22,00	9,68	8,57	1,77
13) Maïs/vesce velue	18,50	28,30	11,65	9,43	2,14
Analyse de variance	Valeur de F (Pr >F)				
Effet précédent	0,63	2,16	0,48	1,62	1,01
Contrastes					
1 versus autres	0,17	1,76	0,49	0,34	0,00
1 versus 2, 3 et 4	0,16	0,59	0,26	0,10	0,04
1 versus 5, 6 et 7	0,21	1,45	0,51	0,29	0,15
1 versus 8, 9 et 10	0,33	0,27	0,69	0,54	0,39
1 versus 11, 12 et 13	0,29	0,46	0,46	0,53	0,18
3 et 4 versus 5, 6 et 7	0,04	0,19	0,79	0,18	0,19
5, 6 et 7 versus 8, 9 et 10	0,14	0,16	0,25	0,30	0,27
5, 6 et 7 versus 11, 12 et 13	0,09	0,01	0,05	0,92	0,03
8, 9 et 10 versus 11, 12 et 13	0,07	0,17	0,30	1,12	0,24

3.2.2. ACTIVITÉS ENZYMATIQUES DU SOL ET TENEURS EN NITRATES

Les résultats reliés aux activités enzymatiques et aux teneurs en nitrates des sols sont présentés dans les tableaux 4 et 5. Sur le site de St Mathieu-de-Beloeil, les précédents de légumineuses seules (luzerne, vesce, trèfle incarnat) et en mélange avec le blé ont significativement augmenté les activités de la phosphatase alcaline et de la déshydrogénase, en comparaison avec les légumineuses à grains (soya, haricot, pois), les précédents de maïs/légumineuses et le sol sans légumineuses (Tableau 4). Les effets sur ces activités enzymatiques ont été plus importants pour les précédents de luzerne, de vesce velue et de trèfle. Ces résultats montrent que ces légumineuses ont accru les activités biologiques dans le sol étudié, la phosphatase alcaline et la déshydrogénase étant reliées au nombre de microorganismes actives dans les sols. Ces résultats démontrent aussi que la formation rapide des macro-agrégats observée dans ce type de sol était reliée aux activités des microorganismes et à la décomposition rapide des biomasses appliquées.

Par ailleurs, les différentes légumineuses ont également accru de façon significative les quantités de nitrates mesurées au stade de 5 à 6 feuilles du maïs. Les nitrates mesurés en cette période indiquent généralement le potentiel de minéralisation de l'azote du sol, de biomasses végétales ou de fumier apportés au sol. Les quantités de nitrates ont été surtout augmentées par les précédents de luzerne, vesce velue, trèfle incarnat et du mélange blé/légumineuses (Tableau 4). Les quantités de nitrates au semis (PPNT) étaient aussi élevées sous ces mêmes précédents de culture, même si leurs effets ne sont pas significatifs en comparaison avec le témoin sans légumineuse. Les légumineuses à grains et les légumineuses en intercalaire avec le maïs n'ont pas eu d'effets significatifs sur les activités enzymatiques ainsi que sur les teneurs en nitrates du sol mesurés au semis et en mi-saison.

Sur le site de St Lambert-de-Lauzon, les précédents de légumineuses n'ont pas significativement augmenté les activités de la phosphatase alcaline et de la déshydrogénase, en comparaison avec le témoin sans légumineuse (Tableau 5). Toutefois, les applications de biomasses de légumineuses ont accru de façon significative les quantités de nitrates du sol au semis et à mi-saison, en comparaison avec le sol témoin sans légumineuse. Les augmentations de nitrates au semis et en mi-saison ont été plus élevées pour les précédents de luzerne, vesce velue, trèfle incarnat, blé/trèfle, blé/pois et blé/vesce et faibles pour les légumineuses à grains et les légumineuses en intercalaire avec le maïs.

Cette étude a démontré que les effets significatifs sur la structure, les activités enzymatiques et les teneurs en nitrates au semis et en mi-saison ont généralement été obtenus avec les légumineuses qui ont produit des quantités plus élevées de biomasses végétales. Les effets de ces légumineuses sur ces paramètres ont cependant été différents selon les sites étudiés probablement à cause des conditions climatiques différentes et par conséquent des taux différents de décomposition des biomasses végétales.

Tableau 4. Analyse de variance des effets des précédents de culture sur les teneurs en nitrates en pré-semis et en post-levée, et sur les activités enzymatiques du sol (Saint-Mathieu-de-Beloel, 2012).

Précédent de culture	PPNT	PSNT	Phosphatase alcaline dg P.N.P/kg	Déshydrogénase dg/g/ 24h
	(0-30 cm) (mg N-NO ³ /kg)	(0-30 cm)		
1) Sans légumineuse	5,97	4,94	367	119
2) Pois sec	6,07	5,71	373	131
3) Haricot sec	5,79	5,22	432	115
4) Soya	7,02	5,72	409	95
5) Luzerne	7,94	6,16	459	130
6) Vesce velue	9,14	6,39	410	146
7) Trèfle incarnat	6,15	5,92	441	121
8) Blé/trèfle incarnat	5,76	5,95	367	110
9) Blé/pois fourrager	5,28	5,89	359	196
10) Blé/vesce velue	16,25	6,79	465	137
11) Maïs/trèfle incarnat	5,69	4,30	375	119
12) Maïs/luzerne	5,87	3,81	384	111
13) Maïs/vesce velue	29,35	5,07	449	121
Analyse de variance	Valeur de F (Pr >F)			
Effet précédent	1,47	2,37*	5,17**	2,94*
Contrastes				
1 versus autres	0,78	4,09**	2,12*	2,47*
1 versus 2, 3 et 4	0,08	1,99	3,49*	0,67
1 versus 5, 6 et 7	0,36	4,68**	4,08**	3,83*
1 versus 8, 9 et 10	0,88	2,07*	1,77	2,19*
1 versus 11, 12 et 13	1,55	1,14	1,34	0,18
2, 3 et 4 versus 5, 6 et 7	0,27	2,59*	0,55	3,10*
5, 6 et 7 versus 8, 9 et 10	0,61	0,59	2,86*	0,62
5, 6 et 7 versus 11, 12 et 13	1,33	3,15**	3,29*	3,73*
8, 9 et 10 versus 11, 12 et 13	0,58	3,40**	0,60	2,04*

*, ** significatif à P < 0,05 et 0,01, respectivement

Tableau 5. Analyse de variance des effets des précédents de culture sur les teneurs en nitrates en pré-semis et en post-levée, et sur les activités enzymatiques du sol (Saint-Lambert-de-Lauzon, 2012).

Précédente culture	PPNT	PSNT	Phosphatase alcaline dg P.N.P/kg	Déshydrogénase dg/g/ 24h
	(0-30 cm)	(0-30 cm)		
	(mg N-NO ³ /kg)			
1) Sans légumineuse	6,16	10,15	152	60
2) Pois sec	7,44	10,65	158	73
3) Haricot sec	6,83	11,90	168	65
4) Soya	6,48	11,31	153	61
5) Luzerne	11,09	21,30	163	69
6) Vesce velue	8,64	15,10	159	57
7) Trèfle incarnat	8,76	12,70	156	63
8) Blé/trèfle incarnat	6,64	11,04	154	59
9) Blé/pois fourrager	8,79	10,86	161	74
10) Blé/vesce velue	8,43	13,80	168	73
11) Maïs/trèfle incarnat	5,47	9,89	163	69
12) Maïs/luzerne	6,87	13,80	156	67
13) Maïs/vesce velue	6,32	9,57	171	58
Analyse de variance	Valeur de F (Pr > F)			
Effet précédent	3,16*	3,12*	0,49	0,46
Contrastes				
1 versus autres	2,28*	1,39*	1,03	0,83
1 versus 2, 3 et 4	0,58	0,66	0,75	0,34
1 versus 5, 6 et 7	4,28**	3,09**	0,72	0,36
1 versus 8, 9 et 10	2,87*	0,99	1,15	1,51
1 versus 11, 12 et 13	0,08	0,47	1,10	0,56
2, 3 et 4 versus 5, 6 et 7	3,64**	2,36*	0,10	0,01
5, 6 et 7 versus 8, 9 et 10	1,14	2,00*	0,55	1,30
5, 6 et 7 versus 11, 12 et 13	4,69**	2,93*	0,43	0,23
8, 9 et 10 versus 11, 12 et 13	3,06**	0,62	0,17	1,09

*, ** significatif à P < 0,05 et 0,01, respectivement

3.3. LES RENDEMENTS EN BLÉ ET MAÏS-GRAIN À SAINT-LAMBERT-DE-LAUZON

La contribution réelle des légumineuses aux rendements et à la nutrition azotée des cultures suivantes n'est pas bien connue. Cette étude a vérifié l'hypothèse selon laquelle il serait possible d'accroître les rendements du maïs-grain et du blé et de réduire les doses de l'engrais azoté sous des précédents de légumineuses ayant enrichi les sols en azote.

Les rendements en blé panifiable et en maïs grain obtenus en 2012 sont présentés dans les tableaux 6 et 7. À la station de recherche de St Lambert-de-Lauzon, les rendements en blé ont varié de 1580 à 2818 kg/ha avec les légumineuses seules, et de 2279 à 3189 kg/ha avec l'apport supplémentaire d'engrais azoté (Tableau 6). Dans les parcelles sans fertilisation azotée (0 kg N/ha), les précédents de légumineuses seules, à l'exception du pois sec, ont tous permis des augmentations de rendement en blé de 140 à 1070 kg/ha par rapport au sol sans légumineuse. Dans ces parcelles, seul l'azote présent dans le sol et minéralisé en cours de saison a été disponible pour la plante. Par rapport au sol sans légumineuse, ces augmentations des rendements en blé ont varié de 8 à 63% selon les précédents de légumineuses. Ces augmentations étaient de 51% (870 kg grain/ha) pour le précédent de trèfle incarnat, et de 63% (1070 kg grain/ha) avec les précédents de vesce velue et de blé/vesce. Ces trois précédents de légumineuses sont aussi ceux dont les quantités de biomasses végétales et d'azote incorporées au sol étaient les plus élevées en 2011. Les augmentations des rendements de blé ont été plus faibles sous les précédents de légumineuses à grains (pois, haricot et soya), et plus faibles encore sous les précédents du maïs en intercalaire avec les légumineuses.

Tableau 6. Rendements en blé et en maïs-grain selon les différents précédents de légumineuses (Saint-Lambert-de-Lauzon, 2012).

Précédent	Rendement en blé		Rendement en maïs-grain	
	Sans engrais N	Avec engrais N	Sans engrais N	Avec engrais N
Sans légumineuse	1730	2374	3820	7425
Pois	1880	2779	3547	7409
Haricot	2373	2610	4298	7072
Soya	2328	2756	3995	7287
Luzerne	2330	2918	5714	7973
Vesce	2818	2995	4822	7467
Trèfle	2620	3189	5383	7804
Blé/Trèfle	1674	2504	4099	7626
Blé/Pois	1950	2396	3720	6940
Blé/Vesce	2022	2822	5668	7743
Maïs/Trèfle	1577	2279	2626	6380
Maïs/Luzerne	1383	2646	4227	6718
Maïs/Vesce	2117	2457	3135	7252

Dans les sols sans engrais azoté (0 kg N/ha), les rendements en maïs grain ont varié de 2626 à 5714 kg/ha selon les précédents de légumineuses, et entre 6380 et 7973 kg/ha avec l'apport d'engrais azoté (Tableau 6). Avec les légumineuses comme seul apport d'azote, les augmentations de rendements en maïs les plus élevées ont été de 26% pour la vesce (1040 kg/ha), de 41% pour le trèfle incarnat (1640 kg/ha), et de 49% pour les précédents de luzerne et du mélange blé/vesce (1960 kg/ha). Comme pour la culture de blé, les rendements en maïs ont été plus faibles dans les sols ayant des précédents de légumineuses à grains (pois, haricot et soya). De même, les précédents de légumineuses en intercalaire avec le maïs ont produit des très faibles rendements en maïs, souvent inférieurs à ceux qui étaient obtenus dans le sol sans légumineuse. Au site de St Lambert, la croissance des légumineuses en intercalaire avec le maïs (trèfle incarnat, vesce velue et luzerne) a été très faible en 2011. Ces cultures ont par conséquent produit de faibles biomasses et de faibles quantités d'azote ont été retournées au sol, ce qui justifie les faibles rendements en blé et en maïs obtenus en 2012 sous ces précédents de culture.

De façon générale, les gains de rendements en blé et en maïs obtenus à St Lambert-de-Lauzon ont été plus élevés pour les précédents de luzerne, trèfle incarnat, vesce et blé/vesce.

3.4. LES RENDEMENTS EN BLÉ ET EN MAÏS À SAINT-MATHIEU-DE-BELOEIL

Les rendements en blé obtenus à St Mathieu -de-Beloeil ont varié de 2233 à 3400 kg/ha sans engrais azoté, et de 3296 à 4040 kg/ha avec l'apport supplémentaire d'engrais azoté (Tableau 7). En comparaison avec le sol sans légumineuse, les précédents de légumineuses seules sans engrais azoté ont permis des augmentations de 20 à 40% de rendements en blé, soit de 600 à 1000 kg grain/ha. Avec l'apport supplémentaire de l'engrais azoté, les rendements en blé étaient aussi plus élevés sous ces mêmes précédents de légumineuses en comparaison avec ceux qui étaient produits dans le sol sans légumineuse.

Tableau 7. Rendements en blé et maïs-grain selon les différents précédents de légumineuses (Saint-Mathieu-de-Beloeil, 2012).

Précédent	Rendement en blé		Rendement en maïs-grain	
	Sans engrais N kg/ha	Avec engrais N	Sans engrais N	Avec engrais N
Sans légumineuse	2432	3409	5912	10 265
Pois	2939	3655	6670	10 380
Haricot	2496	3400	5997	10 243
Soya	3085	3853	7398	11 055
Luzerne	3164	3841	7912	10 765
Vesce	3401	4040	9191	11 960
Trèfle	2233	3296	5069	9225
Blé/Trèfle	2514	3488	5774	10 003
Blé/Pois	2695	3593	5842	10 216
Blé/Vesce	3339	4081	8817	11 832
Maïs/Trèfle	2358	3351	5227	9558
Maïs/Luzerne	2470	3315	5971	9599
Maïs/Vesce	2899	3751	7227	11 253

Sans apport d'engrais azoté, les rendements en maïs grain ont varié de 5069 à 9191 kg/ha selon les espèces de légumineuses et de 9225 à 11960 kg/ha avec l'apport d'engrais azoté (Tableau 7) et ils étaient plus élevés dans les précédents de luzerne, vesce, blé/vesce et maïs/vesce. Les rendements en blé et en maïs ont aussi été augmentés par les précédents de légumineuses à grains (pois, soya), à l'exception du haricot. Les augmentations des rendements du blé et du maïs par les précédents de légumineuses ont été dans cet ordre : vesce>blé/vesce> luzerne, maïs/vesce et soya>pois.

Les résultats de l'analyse de variance des effets des précédents de légumineuses et des apports de l'engrais azoté sur les rendements de blé et du maïs grain sont présentés dans le tableau 8. Les effets des précédents de légumineuses, des apports de l'engrais azoté et leur interaction ont été très significatifs au site de St Mathieu-de-Beloeil. Ces résultats indiquent que les cultures de blé et du maïs ont utilisé sur ce site autant l'azote dérivé des légumineuses incorporées en 2011 ainsi que celui de l'engrais azoté appliqué en 2012. Au site de St-Lambert-de-Lauzon, les légumineuses retournées au sol ainsi que les apports de l'engrais azoté ont également accru de façon significative les rendements en blé. Même si les précédents de légumineuses ont augmenté les rendements de maïs- grain sur ce dernier site, cet effet n'était pas significatif au seuil de $p > 0,05$. D'une part, la culture de maïs présente des exigences élevées en azote par rapport au blé. Le maïs est une culture qui a également besoin d'une plus longue période de végétation pour sa croissance. Ces résultats démontrent que le cultivar à faible unité thermique utilisé à St Lambert-de-Lauzon n'a pas probablement valorisé efficacement l'azote minéralisé des légumineuses dans le sol.

Tableau 8. Effet des légumineuses et engrais azotés sur le rendement du maïs et du blé, sites de Saint-Mathieu-de-Beloil et Saint-Lambert-de-Lauzon.

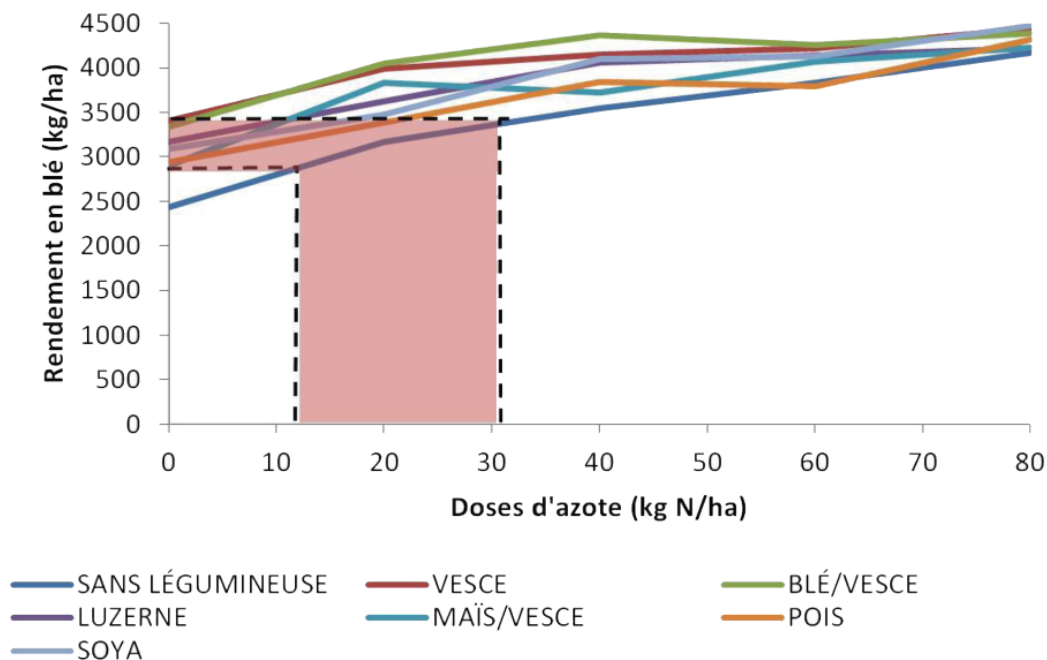
Effet	Rendements de maïs			Rendements de blé	
	DF	Valeur de F	Pr > F	Valeur de F	Pr > F
Site de St-Mathieu					
Précédent	13	4,07	0,0013	5,52	0,0001
Dose d'azote	4	339,31	<,0001	258,70	<,0001
Précédent*dose	52	1,87	0,0083	1,38	0,0812
Site de St-Lambert					
Précédent	13	0,82	0,6399	2,90	0,0474
Dose d'azote	4	32,90	0,0012	12,11	0,0166
Précédent*dose	52	1,29	0,1811	1,77	0,0206

3.5. LES ÉQUIVALENTS EN ENGRAIS AZOTÉ

Afin d'évaluer la contribution de l'azote des légumineuses nous avons déterminé leurs équivalents en engrais azoté. L'équivalent en engrais azoté indique la contribution des légumineuses en azote et par conséquent la dose de remplacement de l'engrais azoté par ces cultures. Pour déterminer ce paramètre, les rendements obtenus sans apport d'engrais azoté (0 kg N/ha) ont été comparés entre les précédents de légumineuses et les sols sans légumineuse (0 kg N/ha) (Figures 1 à 4).

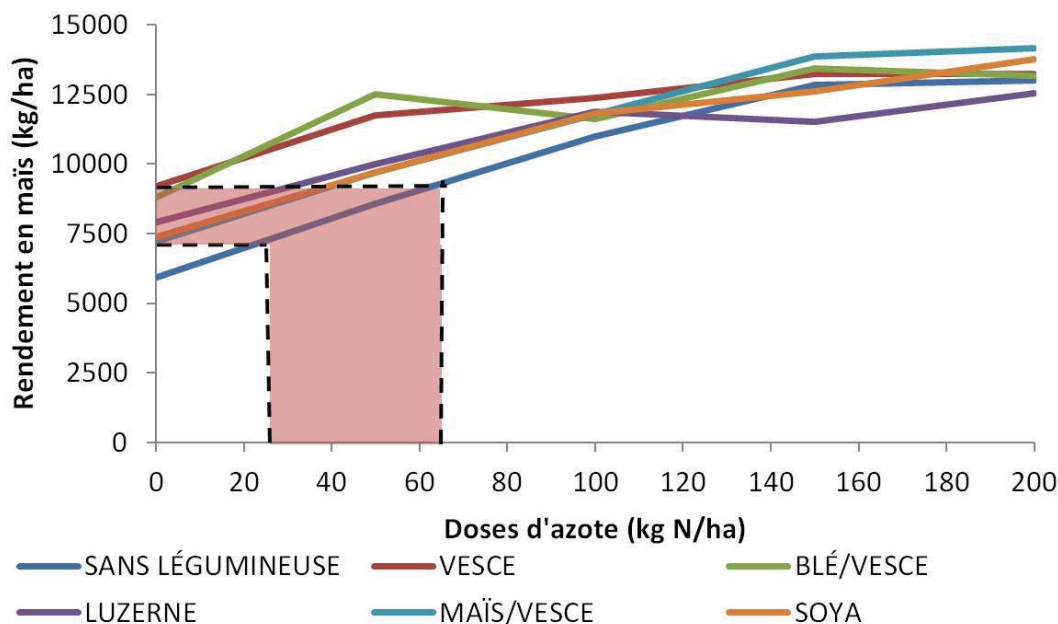
Pour la culture de blé, on observe ainsi que dans les sols sans engrais (0 kg N/ha), les meilleures légumineuses ont produit entre 3000 et 3500 kg/ha à St-Mathieu-de-Beloil (Figure 1). Pour obtenir ces mêmes rendements en blé, des quantités en engrais azotés variant entre 12 et 30 kg N/ha (équivalents en engrais azoté) ont été nécessaires pour le sol sans légumineuse. Les équivalents en engrais azoté ont été de 30 kg/ha pour la luzerne et la vesce, de 25 kg N/ha pour le blé associé à la vesce velue et entre 12 et 20 kg N/ha pour les précédents de maïs/vesce, pois sec et soya (Figure1).

Figure 1. Contribution en azote des légumineuses pour la culture de blé, site Saint-Mathieu-de-Beloil (2012).



Pour la culture de maïs-grain, les équivalents en engrais azoté ont varié entre 25 et 65 kg N/ha selon les précédents de légumineuses (Figure 2). Les équivalents en engrais azoté pour le maïs grain ont été de 25 kg N/ha pour le précédent de soya et de maïs/vesce, de 45 kg N/ha pour le blé/vesce et de 65 kg N/ha pour la vesce et la luzerne.

Figure 2. Contribution en azote des légumineuses pour la culture de maïs, site Saint-Mathieu-de-Beloel (2012).



Les équivalents en engrais azoté obtenus à St Lambert-de-Lauzon étaient élevés pour le blé, variant entre 10 et 80 kg/ha (Figure 3). Les équivalents en engrais azoté étaient de 14 kg N/ha pour la luzerne, le haricot et le soya, de 58 kg N/ha pour le trèfle incarnat et de 80 kg N/ha pour la vesce velue. Toutefois, les équivalents en engrais azoté ont été beaucoup plus faibles pour le maïs-grain. Ils ont varié entre 18 et 24 kg N/ha, étant plus élevés pour la luzerne, le blé/vesce et la vesce velue (Figure 4).

Figure 3. Contribution en azote des légumineuses pour la culture de blé, site Saint-Lambert-de-Lauzon (2012).

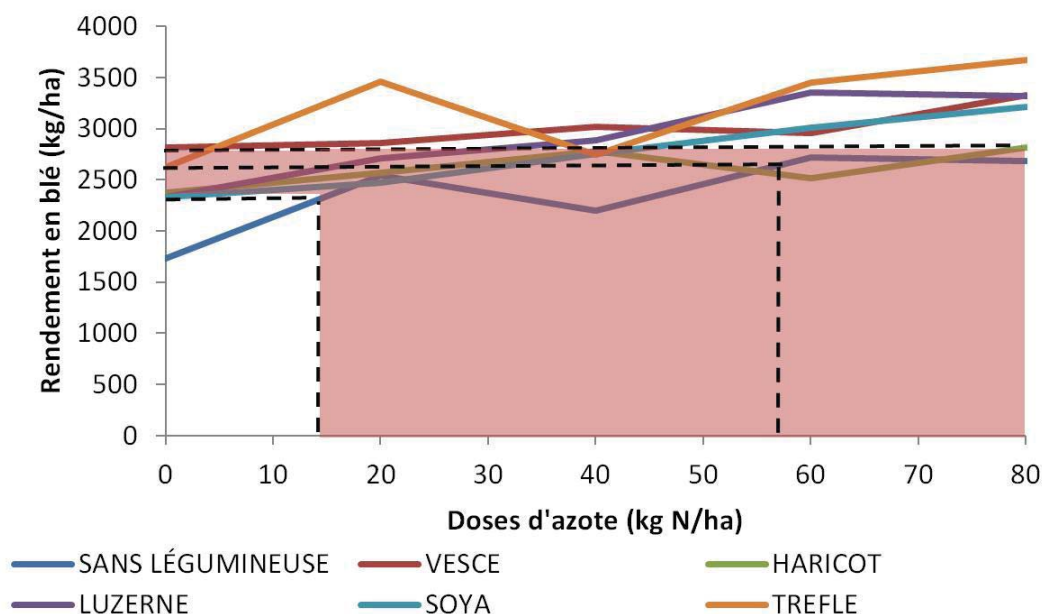
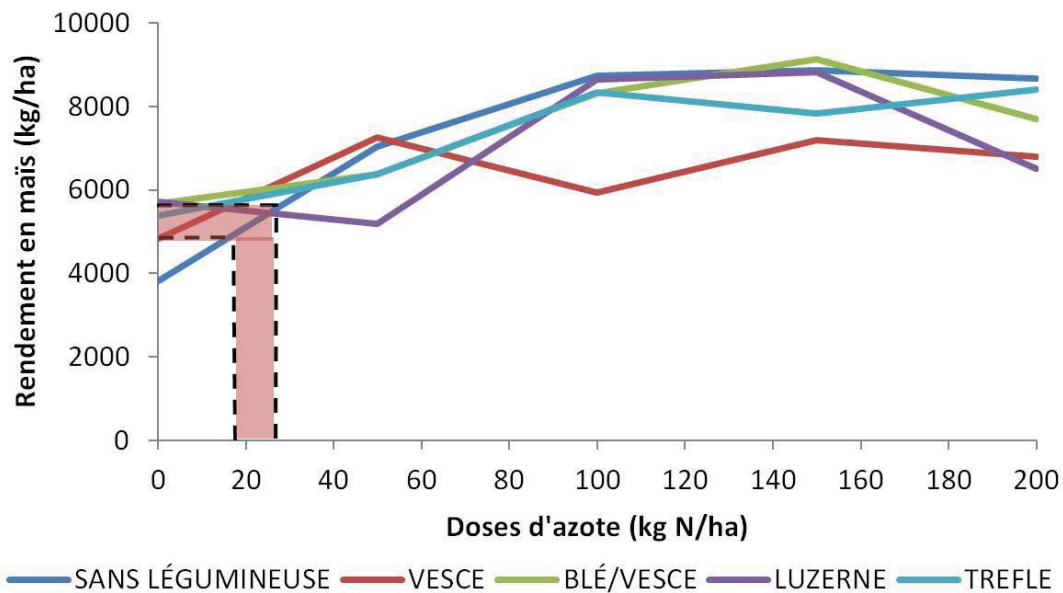


Figure 4. Contribution des légumineuses en azote pour la culture de maïs, site Saint-Lambert-de-Lauzon (2012).



3.6. DOSES ÉCONOMIQUES

Des analyses de régression ont été effectuées pour déterminer les doses économiques d'engrais azotés et les rendements maximum de blé ou de maïs-grain. Les résultats ont démontré que certaines légumineuses ont eu une importante contribution à la nutrition en azote du blé et du maïs-grain.

Au site de St Mathieu-de-Beloil, la réponse du maïs-grain aux applications d'engrais était exprimée sous forme de quadratique-plateau, ce qui a permis de calculer les doses économiques. Sans apport d'engrais azoté, le rendement en maïs grain obtenu dans le sol sans légumineuse (a dans le tableau 9) représentait 50% du rendement maximum. Les sols avec les légumineuses (luzerne, vesce velue, trèfle et blé/vesce et vesce) ont contribué entre 57 et 75% des rendements maximum en maïs obtenus. Pour ces précédents culturaux, les doses économiques pour atteindre les rendements maximum de maïs-grain ont varié de 123 à 149 kg N/ha (Tableau 9). Ces doses économiques étaient plus faibles que la dose recommandée pour le maïs-grain (175 kg N/ha), alors que qu'elles étaient supérieures à 200 kg N/ha pour le sol sans légumineuses et pour les autres précédents de culture (Tableau 9). Ces résultats indiquent une importante contribution de ces légumineuses en azote, ce qui a permis de réduire les doses d'engrais azotés pour la culture de maïs-grain. Les mélanges de blé/légumineuse et de maïs/légumineuses ont donné une faible contribution en azote, le sol ayant contribué entre 50 à 54% des rendements maximum de maïs-grain selon les précédents de culture. Cette faible contribution aux rendements est probablement attribuable à un faible taux de décomposition des mélanges de légumineuses avec la paille de céréales ou les tiges de maïs.

Tableau 9. Rendements maximum de maïs-grain et doses économiques, selon les précédents de légumineuses (Saint-Mathieu-de-Beloil, 2012).

Précédents	Paramètres de régression			R ²	Rend. max (t/ha)	Dose écon. N (kg/ha)
	a*	b	c			
Céréale	5380,00	40,03733	---	0,88	12 290	
Pois sec	9946,84	20,42425	---	0,33	13 168	149
Haricot sec	6657,3333	35,85400	---	0,82	12 963	
Soya	7931,46667	31,24067	---	0,89	13 751	
Luzerne	7982,87	54,5556	-0,1221	0,74	13 169	141
Vesce velue	9945,67	49,5406	-0,1597	0,59	13 650	135
Trèfle incarnat	6947,87	95,8487	-0,3899	0,81	12 838	123
Blé/trèfle incarnat	6280,66667	37,22733	---	0,92	13 023	
Blé/pois fourrager	6455,6667	37,60000	---	0,92	13 303	
Blé/vesce velue	7170,03	82,1750	-0,2761	0,90	13285	149
Maïs/trèfle incarnat	5494,8	40,63667	---	0,91	12 828	
Maïs/luzerne	6313,6	32,854	---	0,80	12 198	
Maïs/vesce velue	7647,37346	37,49772	---	0,91	14 172	

* : rendement de maïs sans engrais azoté (kg /ha)

Les sols avec les légumineuses ont également contribué aux rendements en blé, soit entre 61 et 80% des rendements maximum en blé. Les contributions les plus importantes ont été obtenues pour les précédents de pois, de soya et de la luzerne (70%); de la vesce velue (80%) et des mélange blé/vesce et maïs/vesce (72-77%). Pour ces précédents de légumineuses, les doses économiques nécessaires pour obtenir des rendements maximum en blé (4000 kg /ha) ont varié de 43 à 79 kg N/ha, et elles étaient supérieures à 80 kg N/ha pour les autres précédents de culture (Tableau 10).

Tableau 10. Rendements maximum de blé et doses économiques, selon les précédents de légumineuses (Saint-Mathieu-de-Beloil, 2012).

Précédents	Paramètres de régression			R ²	Rend. max (t/ha)	Dose écon. N (kg/ha)
	a*	b	c			
Céréale	2406,87	19,88167	---	0,84	3 817	
Pois sec	3021,93	15,82	---	0,70	4 322	
Haricotsec	2640,20	19,01	---	0,83	4 083	
Soya	3165,53	17,18	---	0,76	4 475	
Luzerne	3156,12	29,4822	-0,2069	0,68	4 432	51
Vesce velue	3576,93	31,5683	-0,2312	0,60	4 647	62
Trèfle incarnat	2194,75	44,1438	-0,2769	0,89	3 954	76
Blé/trèfle incarnat	2498,17	43,8835	-0,3241	0,92	3 984	68
Blé/pois fourrager	2819,8	18,67	---	0,75	4 260	
Blé/vesce velue	3336,32	47,11	-0,5541	0,80	4 338	43
Maïs/trèfle incarnat	2400,02	38,2117	-0,2407	0,56	3 917	79
Maïs/luzerne	2522,33	19,81	---	0,86	4 012	
Maïs/vesce velue	3015,85	30,7511	-0,2061	0,61	4 163	75

* : rendement de blé sans engrais azoté (kg /ha)

Au site de St Lambert-de- Lauzon, la réponse aux apports d'engrais azotés a été linéaire pour le maïs-grain et le blé. Il n'a pas ainsi été possible de calculer les doses économiques nécessaires pour atteindre les rendements maximum pour ces cultures.

3.7. BÉNÉFICES ÉCONOMIQUES

Les revenus nets obtenus en 2012 pour le blé et le maïs cultivés à St Mathieu-de-Beloeil sous les précédents de légumineuses cultivées seules (luzerne, vesce velue et trèfle incarnat) ont représenté 24% et 60% respectivement, en comparaison avec les précédents de cultures avec récoltes en en 2011 (Tableau 11 et 12). Même si les rendements en blé et en maïs ainsi que les revenus bruts obtenus seulement dans une seule année (2012) étaient plus élevés sous les précédents de ces légumineuses, les revenus nets ont été plus faibles à cause de la perte d'une récolte en 2011.

Tableau 11 : Revenus bruts, coûts variables et revenus nets à l'hectare des cultures de blé et maïs-grain selon les précédents culturaux à Saint-Mathieu-de-Beloeil (2011 et 2012).

Précédent cultural	Blé			Maïs-grain		
	Revenus bruts (\$)	Coûts variables (\$)	Revenus nets (\$)	Revenus bruts (\$)	Coûts variables (\$)	Revenus nets (\$)
Blé	2 496	1 012	1 483	4 791	1 442	3 346
Haricot sec	1 184	1 223	-39	3 435	1 642	1 793
Pois sec	2 948	906	2 042	4 951	1 315	3 636
Soya	2 653	885	1 768	5000	1 315	3 684
Luzerne	1 219	870	349	3 198	1 276	1 922
Vesce velue	1 289	1 079	210	3 495	1 626	1 869
Trèfle incarnat	1 146	768	379	2 872	1 155	1 716
Blé/trèfle incarnat	1 977	958	1 018	4 273	1 378	2 894
Blé/pois	2 184	906	1 278	4 474	1 330	3 144
Blé/vesce	1 258	1000	258	3 489	1 421	2 068
Maïs/trèfle incarnat	2 725	1 378	1 347	4 988	1 795	3 193
Maïs/luzerne	2 258	1 481	777	4 327	1 888	2 439
Maïs/vesce	2 074	1 445	629	4 623	1 881	2 741

Au site de St Lambert-de-Lauzon, les revenus bruts et nets obtenus pour le blé et le maïs ont été également plus élevés dans les précédents qui ont permis deux récoltes en deux ans, en comparaison avec les légumineuses cultivées seules. Les revenus nets étaient négatifs pour la culture de blé sous les précédents de légumineuses seules, et ils étaient également très faibles pour le maïs-grain (Tableau 12).

Tableau 12. Revenus bruts, coûts variables et revenus nets à l'hectare des cultures de blé et maïs-grain selon les précédents culturaux à Saint-Lambert-de-Lauzon (2011 et 2012)

Précédent cultural	Blé			Maïs-grain		
	Revenus bruts (\$)	Coûts variables (\$)	Revenus nets (\$)	Revenus bruts (\$)	Coûts variables (\$)	Revenus nets (\$)
Blé	1 942	1 560	383	3 735	1 919	1 815
Haricot sec	2 444	1 776	667	3 996	2 128	1 868
Pois sec	2 818	1 382	1 436	4 356	1 745	2 610
Soya	2 234	1 410	824	3 250	1 738	1 512
Luzerne	961	1 364	-403	2 072	1 699	372
Vesce velue	964	1 449	-485	803	1 769	33
Trèfle incarnat	1 065	1 311	-246	2 179	1 652	527
Blé/trèfle incarnat	2 249	1 490	759	3 563	1 838	1 725
Blé/pois	711	1 367	-656	2 177	1 708	469
Blé/vesce	996	1 483	-487	2 042	1 817	226
Maïs/trèfle incarnat	2 217	1 791	425	3 472	2 130	1 343
Maïs/luzerne	2422	1 885	536	3 508	2 226	1 282
Maïs/vesce	2 348	1 993	354	3 883	2 344	1 540

Les résultats obtenus ont montré que les revenus nets étaient faibles avec les légumineuses cultivées seules en 2011 qui n'ont pas permis une récolte. Même si les biomasses des légumineuses ainsi que les quantités d'azote incorporées au sol aient été presque identiques dans les deux régions, les rendements ainsi que les revenus nets obtenus pour le blé et le maïs-grain ont été en général plus élevés à St Mathieu en Montérégie qu'à St Lambert dans Chaudières Appalaches. Ceci est probablement relié à une faible minéralisation et valorisation de l'azote des légumineuses sous les conditions climatiques plus froides de cette région. Dans des conditions climatiques qui favorisent la croissance des plantes et la minéralisation de l'azote, les légumineuses semées seules peuvent augmenter les rendements de blé et de maïs-grain et maintenir les bénéfices économiques, ainsi que le démontrent les résultats obtenus à St Mathieu-de-Beloeil. Les effets des légumineuses sur les rendements et les revenus nets ont été plus importants pour le maïs en comparaison avec le blé, le maïs étant une culture avec une plus longue période de croissance qui peut valoriser ainsi l'azote minéralisé des biomasses des légumineuses.

4. CONCLUSION

- La croissance et le potentiel de fixation d'azote des légumineuses étudiées n'ont pas été différents entre les deux régions climatiques, mais plutôt selon les espèces de légumineuses. Les quantités de biomasses et d'azote produites ont été beaucoup plus élevées pour la vesce velue, la luzerne et le mélange blé/vesce, en comparaison avec les légumineuses à grains, (soya, pois et haricot). Les légumineuses en intercalaire avec le maïs n'ont pas été performants.
- Les équivalents en engrais azoté ou le remplacement de l'engrais azoté ainsi que les augmentations des rendements du blé et du maïs ont été plus élevés selon cet ordre : vesce>blé/vesce> luzerne, maïs/vesce et soya>pois.
- Cette contribution réelle en azote par ces légumineuses a permis des réductions importantes de doses d'engrais azotés, allant de 30 à 53 kg N/ha, selon les précédents de culture.
- Les cultures de légumineuses ont rapidement amélioré la structure du sol et augmenté les teneurs en nitrates ainsi que les activités biologiques et enzymatiques des sols étudiés. Les effets des légumineuses sur l'amélioration des conditions du sol ont été plus élevés pour la vesce velue, la luzerne et le mélange blé/vesce, et ceci est attribuable aux grandes quantités de biomasses incorporées sous ces précédents de culture. Les effets de ces légumineuses sur la dynamique des propriétés des sols et sur les niveaux de rendements du blé et du maïs ont été plus importants au site de Saint-Mathieu-de-Beloeil, ce qui suggère que les conditions climatiques plus chaudes dans cette région ont permis une plus rapide décomposition des biomasses végétales incorporées au sol et par conséquent une amélioration significative des conditions de sol et une valorisation efficace de l'azote des légumineuses par ces cultures.
- Avec une seule année de rotation avec les légumineuses seules, les revenus nets obtenus pour le blé et le maïs ont représenté 24 et 60% par rapport à ceux qui étaient mesurés pour les précédents de légumineuses avec deux récoltes vendables. Toutefois, ce sont les régies de légumineuses seules qui ont augmenté le plus la productivité des sols, soit les rendements, la nutrition azotée et amélioré les propriétés physiques et biologiques des sols.
- Dans des conditions climatiques qui favorisent la croissance des plantes et la minéralisation de l'azote, les légumineuses semées seules pourraient donc augmenter les rendements des cultures et les bénéfices économiques, ainsi que le démontrent les résultats obtenus à Saint-Mathieu-de-Beloeil.

