

Formation

Cultures de couverture en grandes cultures

Ce projet a été financé par le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation dans le cadre du programme Prime-Vert.

Avec l'appui de :

Québec 



SPGBQ
SYNDICAT DES PRODUCTEURS
DE GRAINS BIOLOGIQUES DU QUÉBEC


**PRODUCTEURS DE
GRAINS**
DU QUÉBEC





Formation

Cultures de couverture en grandes cultures

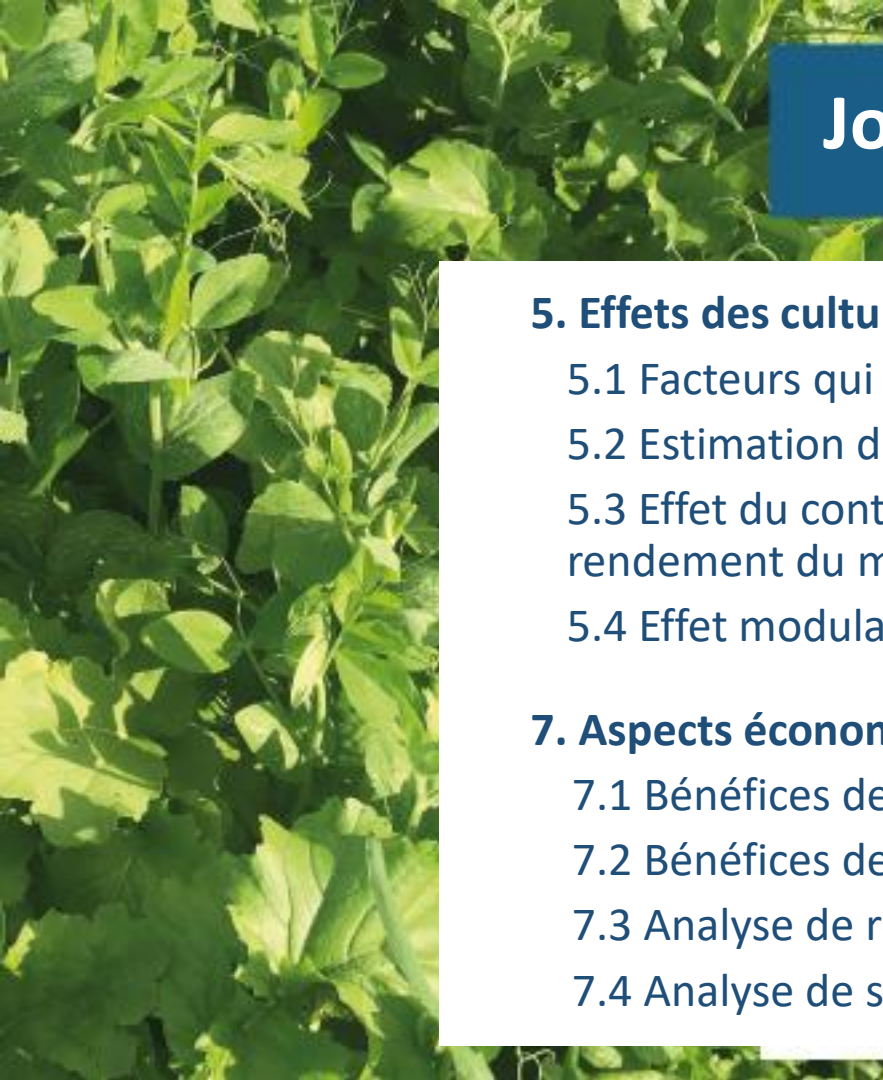
PRODUCTION CONVENTIONNELLE ET BIOLOGIQUE zones 1 et 2

Formation donnée par : Sophie Rivest-Auger, agr.

Conseillère en grandes cultures biologiques au CETAB+

Contenu préparé par Anne Weill, agr. et Sylvie Thibaudeau, agr.

© Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec, 2025



Jour 4 : Chapitres 5 et 7

5. Effets des cultures de couverture sur la dynamique de l'azote

5.1 Facteurs qui influencent les apports d'azote

5.2 Estimation de l'apport d'azote

5.3 Effet du contenu en azote des couverts végétaux sur le rendement du maïs

5.4 Effet modulateur de la fertilisation azotée

7. Aspects économiques

7.1 Bénéfices des CC à la ferme

7.2 Bénéfices des CC pour la société

7.3 Analyse de rentabilité à court terme de la CC

7.4 Analyse de sensibilité

A close-up photograph of a dense field of green cover crop plants, likely vetch or a similar legume, showing their characteristic trifoliate leaves and stems.

Chapitre 5

Effets des cultures de couverture sur la dynamique de l'azote

5.1 Facteurs qui influencent les apports d'azote

5.2 Estimation de l'apport d'azote

5.3 Effet du contenu en azote des couverts végétaux sur le rendement du maïs

5.4 Effet modulateur de la fertilisation azotée

Chapitre 5 - QUIZ

1. Quels sont les facteurs qui affectent la **contribution en azote (N)** des CC?
2. Selon vous, quel serait un ratio C/N adéquat pour obtenir une bonne **minéralisation** de l'azote?
3. Quelles sont les étapes pour estimer le **contenu en N** d'une CC?



5.1 Facteurs qui influencent les apports d'azote

5.1.1 Caractéristiques de la CC

5.1.2 Conditions climatiques et activité microbienne du sol

5.1.3 Moment de destruction des CC et travail du sol



5.1.1 Caractéristiques de la CC influençant l'azote



- Caractéristique 1 : espèce
- Caractéristique 2 : biomasse
- Caractéristique 3 : concentration en N
- Caractéristique 4 : rapport C/N
- Caractéristique 5 : stade de maturité de la CC lors de sa destruction

Caractéristiques de la CC influençant l'azote

- Caractéristique 1 : **espèce**
 - Légumineuses : fixation N
 - Graminées, crucifères : recyclage de N

- Caractéristique 2 : **biomasse**
 - Très importante, mais il peut y avoir parfois un effet positif sur le rendement avec de très petites biomasses (1 t/ha)

- Caractéristique 3 : **concentration en N**
 - Plus la concentration en N est élevée, plus l'apport d'azote sera important
 - Exprimée en % de N

Caractéristiques de la CC influençant l'azote (suite)

➤ Caractéristique 4 : **rapport C/N**

- Détermine la vitesse de décomposition de la biomasse
 - C/N inférieur à 20 : décomposition assez rapide
 - Calcul du C/N
 - Contenu en carbone stable à environ 45 % de la biomasse sèche
 - Donc, il suffit de connaître le % de N pour connaître le ratio C/N (ou inversement)

$$\text{C/N} = \% \text{ C} / \% \text{ N}$$

- Avec un % N = 2,25, on peut déduire le C/N : $45 \% / 2,25 = 20$

Caractéristiques de la CC influençant l'azote (suite)

- Caractéristique 5 : **stade de maturité de la CC lors de sa destruction** (relié C/N)
 - Le rapport C/N augmente avec l'âge ou le stade de développement de la plante
 - La décomposition des feuilles est 5 fois plus rapide que celle des tiges et les racines se décomposent encore plus lentement que les tiges
 - Légumineuses, crucifères :
 - C/N augmente après le stade bouton floral
 - Légumineuse au stade bouton floral : C/N = 10 à 15
 - Graminées :
 - C/N augmente au fur et à mesure de l'élongation des tiges
 - Tallage : C/N = 18
 - Élongation de la tige : C/N = 24
 - Gonflement de l'épi : C/N = 35

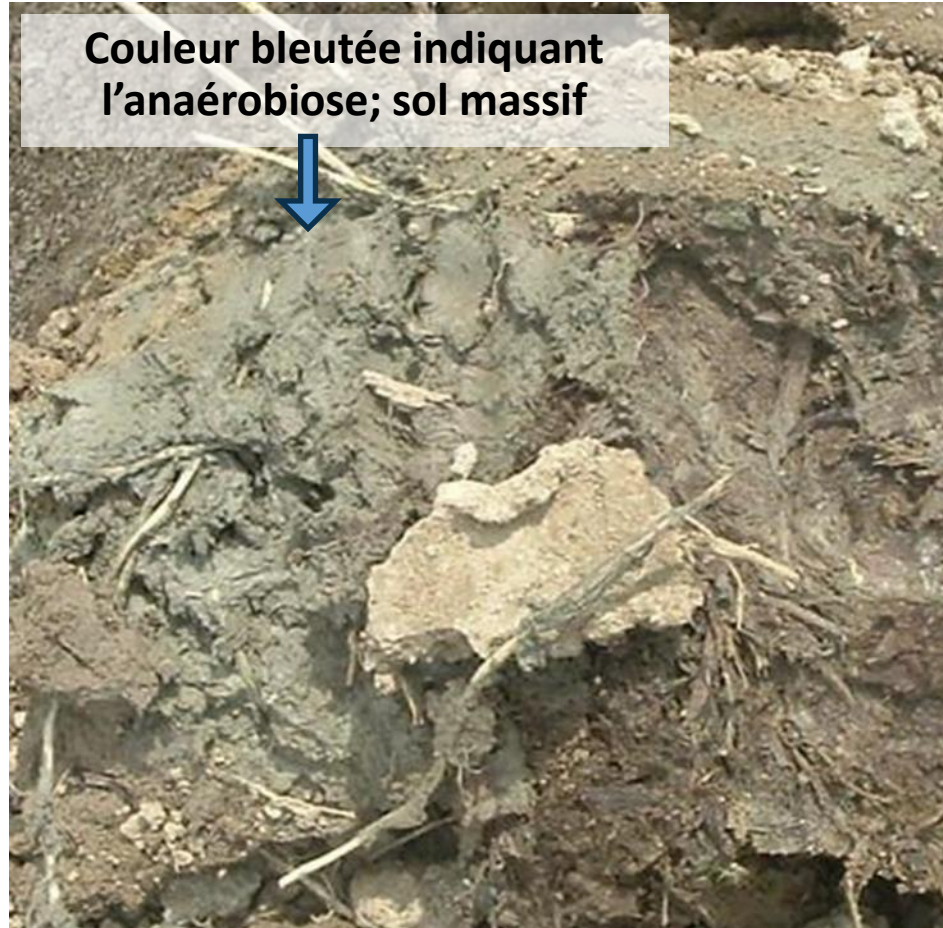


5.1.2 Conditions climatiques et activité microbienne du sol influençant l'azote



- Décomposition des CC et fourniture de N = fonction de l'activité biologique
- Activité biologique fonction de :
 - Condition chaudes et humides → plus d'activité microbienne (pic atteint lorsque 60 % des pores sont remplis d'eau)
 - Aération du sol (sols compacts → pas d'air → très peu d'activité biologique)
- Quantité de précipitations automnales, hivernales et printanière (lessivage)
- Explique la grande variabilité des apports d'azote par les CC

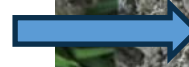
Très faible activité biologique : sol compact et en anaérobiose



Faible activité biologique : sol compact et vieux résidus présents

Couches de sol :

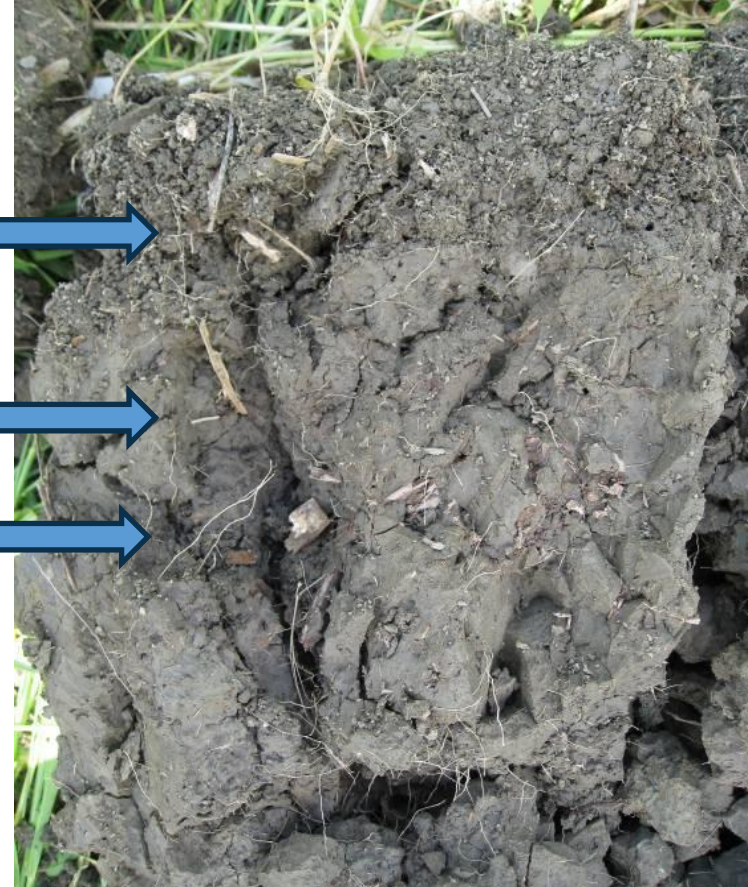
Vibroculteur



Labour non repris compacté par les passages au printemps



Fond du labour
(vieux résidus visibles)



Faible activité biologique : sol compact et vieux résidus de fumier non décomposés

**Vieux résidus de fumier
non décomposés**



Sol bien structuré (agrégats), ce qui favorise l'activité biologique (aération)





5.1.3 Moment de destruction des CC et travail du sol influençant l'azote



- Moment de destruction déterminé en fonction :
 - Du cycle vital de la CC (annuelle, bisannuelle, vivace)
 - De la biomasse, de la maturité et du système de production (biologique ou non)
 - Du type de travail de sol :
 - L'incorporation accélère la minéralisation = ne pas enfouir les CC trop tôt à l'automne.
 - En semis direct, la libération de l'azote est plus lente et plus graduelle.
- **Objectif : Synchroniser la minéralisation du N avec les besoins de la culture suivante**
- **Attention : l'azote provenant des CC aura un comportement différent de l'azote provenant d'un engrais minéral (arrière-effet azoté)**



5.2 Estimation de l'apport d'azote

5.2.1 Étapes du calcul de l'apport d'azote à la culture subséquente

5.5.2 Autre méthode pour estimer les apports d'azote : l'équivalent en azote minéral (ENM)

5.2.3 Essais expérimentaux à la ferme

ATTENTION : pas de recette unique, incertitude toujours présente...



5.2.1 Étapes du calcul de l'apport d'azote à la culture subséquente



- Étape 1 : Estimer le rendement en matière sèche de la biomasse aérienne
- Étape 2 : Déterminer la concentration et le contenu en azote de la biomasse aérienne
- Étape 3 : Déterminer la quantité d'azote accumulée dans la biomasse racinaire (facultative)
- Étape 4 : Déterminer les coefficients de minéralisation de l'azote



Étape 1 : Estimer le rendement en matière sèche de la biomasse aérienne

➤ Méthode 1 : Échantillonnage au champ et mesure de l'azote

- Prélever des échantillons de la CC à des endroits représentatifs du champ juste avant l'arrêt de la croissance de la CC (dû au gel mortel, à un herbicide ou à une action mécanique).
- Couper toute la biomasse aérienne près du sol, pour une superficie déterminée (50 cm x 50 cm par exemple) sur plusieurs quadras.
- Peser les échantillons humides, puis peser et sécher un sous-échantillon à 70 °C pendant 24 heures.

Étape 1 : Estimer le rendement en matière sèche de la biomasse aérienne

- Méthode 2 : Mesure de la hauteur de la CC pour les **légumineuses** (méthode approximative; développée en Oregon)
- À 15 cm de hauteur ET recouvrant 100 % de la surface
= rendement de 2240 kg MS/ha
 - Ajouter 170 kg MS/ha par tranche de 2,5 cm additionnelle
 - Si le recouvrement n'est pas complet (100 %), multiplier le rendement par le % de recouvrement effectif :

Hauteur (cm)	Recouvrement (%)	MS (kg/ha)
30	100	$2240 + ([15 / 2,5] * 170) = 3260$
30	60	$3260 * (60/100) = 1956$



Étape 2 : Déterminer la concentration et le contenu en azote de la biomasse aérienne

- Possibilité 1 : Envoyer un échantillon représentatif de la biomasse aérienne au labo
- Possibilité 2 : Estimation grossière

Espèce	Stade	% N	Remarque
Légumineuses annuelles	Avant floraison	3,5-4,0	
	À la floraison	3-3,5	Après la floraison, la concentration en N diminue rapidement
Légumineuses vivaces	Diminuer les chiffres précédents de 1 % s'il y a beaucoup de tiges		
Trèfle rouge	À la floraison	3-3,5	(résultats d'essais au Qc, malgré les tiges)
Graminées et crucifères	Avant floraison	2-3	
	Après floraison	1,5-2,5	

Étape 2 : Déterminer la concentration et le contenu en azote de la biomasse aérienne

Exemple de calcul du contenu en azote (N total en kg/ha), en utilisant le tableau de référence précédent :

$$\text{N total} = \text{biomasse aérienne sèche (kg/ha)} \times \% \text{ de N dans la biomasse}$$

- Exemple pour un trèfle rouge en intercalaire avec biomasse de 3000 kg/ha MS dans une céréale
 - Contenu en N (kg N/ha) :
 $3000 \text{ kg MS/ha} \times 3,2 \% = 96 \text{ kg N/ha}$



Étape 3 : Déterminer la quantité d'azote accumulée dans la biomasse racinaire (facultative)

- Contribution en N des racines est difficile à mesurer et à estimer
- Multiplier le contenu en N de la biomasse aérienne par un coefficient de correction pour tenir compte de l'apport du système racinaire
- Coefficients utilisés en France :
 - 1,1 à 1,2 pour les crucifères
 - 1,2 pour les graminées
 - 1,3 pour les légumineuses
 - 1,3 pour une légumineuse vivace comme le trèfle rouge
 - 1,4 à 1,5 pour le mélilot
- Risque de surestimer l'azote (concentration plus faible en N, C/N supérieur à 20, développement racinaire incertain)

Étape 3 : Déterminer la quantité d'azote accumulée dans la biomasse racinaire (facultative)

- Transfert d'azote de la légumineuse intercalaire à la culture principale
 - Se fait par senescence des racines, exsudation de composés azotés solubles par les racines et par les mycorhizes
 - Possible avec légumineuses pérennes et légumineuses intercalaires
 - Moins probable avec mélanges de courte durée

- Non pris en compte dans les calculs



Étape 4 : Déterminer les coefficients de minéralisation de l'azote

- Plusieurs façons d'estimer les coefficients de minéralisation de l'azote
 - CPVQ^a, Jobin et Douville^b (Québec) : 0,5-0,7
 - Ne tient pas compte du C/N, surestimation possible
 - Méthode MERCI^c (France) :
 - Tient compte C/N de la CC
 - Pois fourrager avec C/N = 13, coefficient = 0,5
 - Tournesol avec C/N = 26, coefficient = 0,25
 - *Attention : mis au point pour la région Poitou-Charente en France*
 - Méthode de l'Oregon : test d'incubation de sols (avec CC) en laboratoire

Méthode de l'Oregon

Aperçu de l'article de Sullivan et Andrews (Oregon State University)

Archival copy. For current version, see: <https://catalog.extension.oregonstate.edu/pnw636>
PNW 636 • November 2012

ESTIMATING PLANT-AVAILABLE NITROGEN RELEASE FROM COVER CROPS



D.M. Sullivan and N.D. Andrews

HIGHLIGHTS

- Legume cover crops provide up to 100 lb PAN/a. To maximize PAN contribution from legumes, kill the cover crop at bud stage (early May).
- Cereal cover crops immobilize up to 50 lb PAN/a. To minimize PAN immobilization from cereals, kill the cover crop during the early stem elongation (jointing) growth stage (early April).
- Legume/cereal cover crop mixtures provide a wide range of PAN contributions, depending on legume content. When cover crop dry matter is 75 percent from cereals + 25 percent from legumes, PAN is usually near zero.
- A laboratory analysis for cover crop total N as a percentage in dry matter (DM) is a good predictor of a cover crop's capacity to release PAN for the summer crop.
 - When cover crops contain a low N percentage (less than 1.5 percent N in DM), they provide little or no PAN.
 - When cover crops contain a high N percentage (3.5 percent N in DM), they provide approximately 35 lb PAN/ton of dry matter.
 - PAN release increases linearly, as cover crop N percentage (in DM) increases from 1.5 to 3.5 percent.
- Cover crops decompose rapidly and release or immobilize PAN rapidly. Most PAN is released in 4 to 6 weeks after cover crop kill.
- PAN from legume cover crops is usually much less expensive than PAN from organic fertilizers.
- Values for cover crop PAN listed here are most applicable to winter cover crop/summer vegetable crop rotations in western Oregon and Washington.

Dan M. Sullivan, Extension soil scientist, and Nick D. Andrews, small farms Extension agent, both of Oregon State University

A Pacific Northwest Extension Publication
Oregon State University • Washington State University • University of Idaho

Méthode de l'Oregon

Tableau 5.1. Coefficients de minéralisation de l'azote total de couverts végétaux après 4 et 10 semaines d'incubation à une température constante de 22 °C (méthode de l'Oregon)

Concentration en azote de la biomasse sèche (%)	Coefficient de minéralisation de l'azote total selon la durée d'incubation	
	4 semaines	10 semaines
1,0	- 0,32	- 0,12
1,5	- 0,11	0,07
2,0	0,11	0,26
2,5	0,28	0,38
3,0	0,34	0,42
3,5	0,39	0,46
4,0	0,45	0,50

Source : Adapté de Sullivan et coll., 2019.

Méthode de l'Oregon

- Exemple : CC de trèfle intercalaire dans une céréale
 - Biomasse (aérienne seulement) : 3000 kg MS/ha
 - Concentration en azote : 3,2 % de N
 - Coefficient compris entre 0,42 et 0,46, soit 0,44
 - Contenu en N : $3000 \text{ kg MS/ha} \times 3,2 \% = 96 \text{ kg N/ha}$
 - Apport N : $96 \text{ kg N/ha} \times 0,44 = \mathbf{42 \text{ kg N/ha}}$

Méthode de l'Oregon : résultats de tests d'incubation

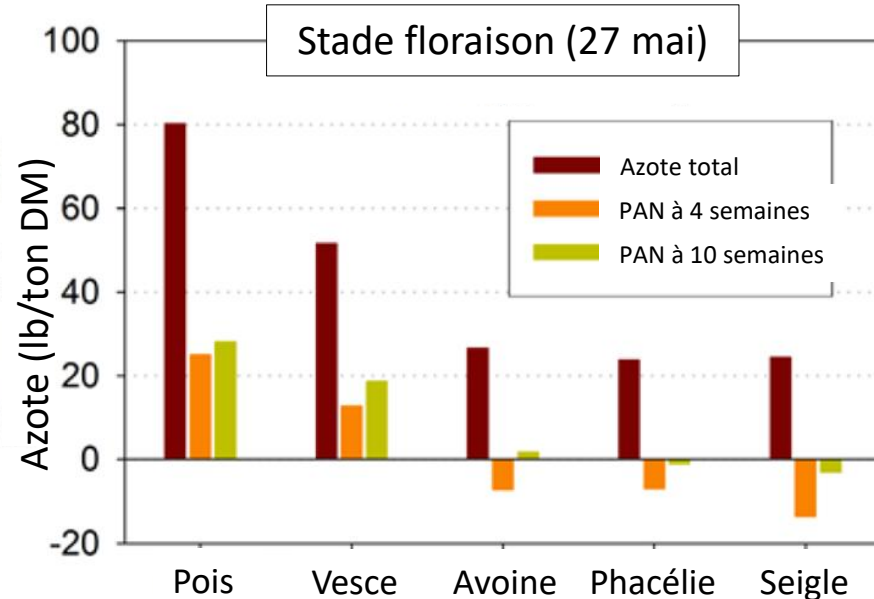
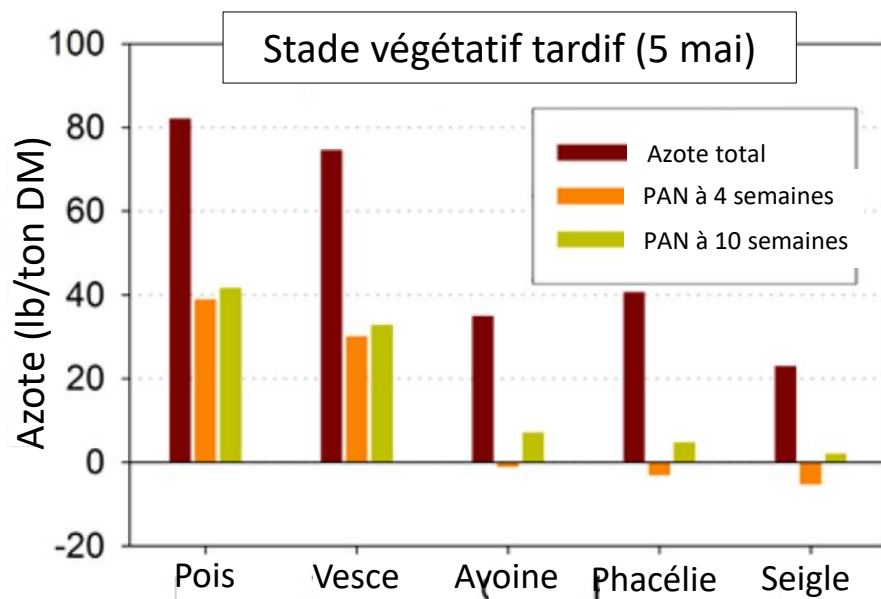


Figure 14. Retarder l'incorporation de la culture de couverture à la fin mai réduit l'azote disponible pour les plantes (*Plant-Available Nitrogen* – PAN). La biomasse aérienne a été récoltée le 5 mai (gauche) ou le 27 mai (droite) sur le même champ, dans la Vallée Willamette nord (Oregon). Source : Sullivan et coll., 2020

Conversion : lb/t courte = 0,5 kg/t

Méthode de l'Oregon

➤ **ATTENTION**, plusieurs facteurs affectent la minéralisation et peuvent diminuer les coefficients :

- Climat
- Texture et structure du sol
- Méthodes d'enfouissement
- Type de culture :
 - Le maïs bénéficie de la minéralisation du N pendant 5 mois.
 - Une céréale bénéficie de la minéralisation du N pendant 3,5 mois.

Chapitre 5 - EXERCICE 1

Calculer le contenu en azote total pour une culture de pois en utilisant la méthode approximative développée en Oregon. Il s'agit d'une CC de pois fourrager de 70 cm de hauteur et qui couvre 100 % du sol. La teneur en N de cette CC est de 4 %.

Chapitre 5 - EXERCICE 2

Calculer l'apport d'azote de la CC ayant une biomasse de 4 t/ha pour une culture de maïs en utilisant la méthode du CPVQ/Centre d'agrobiologie et la méthode développée en Oregon pour les deux situations suivantes :

- Le contenu en azote total est de 4 %;
- Le contenu en azote est de 2 %.



5.2.2 Autre méthode : l'équivalent en azote minéral (ENM)



- Définition de l'ENM
- Estimation des apports d'azote pour le maïs selon l'ENM



ENM : Définition

- Équivalent en azote minéral ou ENM :
 - Quantité d'azote minéral à appliquer pour obtenir un rendement d'une culture commerciale sans implantation de CC équivalent à celui d'une culture commerciale avec CC obtenu sans apport d'azote minéral
- Basé sur une courbe de réponse de la culture à l'azote minéral

Équivalent en azote minéral

- ENM : Méthode complémentaire aux méthodes théoriques précédentes, qui permet d'intégrer plusieurs facteurs (type de sol, climat, minéralisation, etc.)
- Basée sur des essais au champ, avec répétitions
- Les différences de rendement avec et sans CC sont dues :
 - À la fourniture d'azote par la CC (fonction de la décomposition des CC)
 - À l'effet des CC sur le sol

Équivalent en azote minéral

Exemple

Rendement d'une culture de blé après CC et sans engrais minéral : **3332 kg/ha**

Sans CC, il faudrait 45 kg de N pour obtenir ce rendement : L'ENM de cette CC est donc **45 kg/ha**

Le N total de la CC était de 95 kg/ha (biomasse aérienne mesurée avant enfouissement)

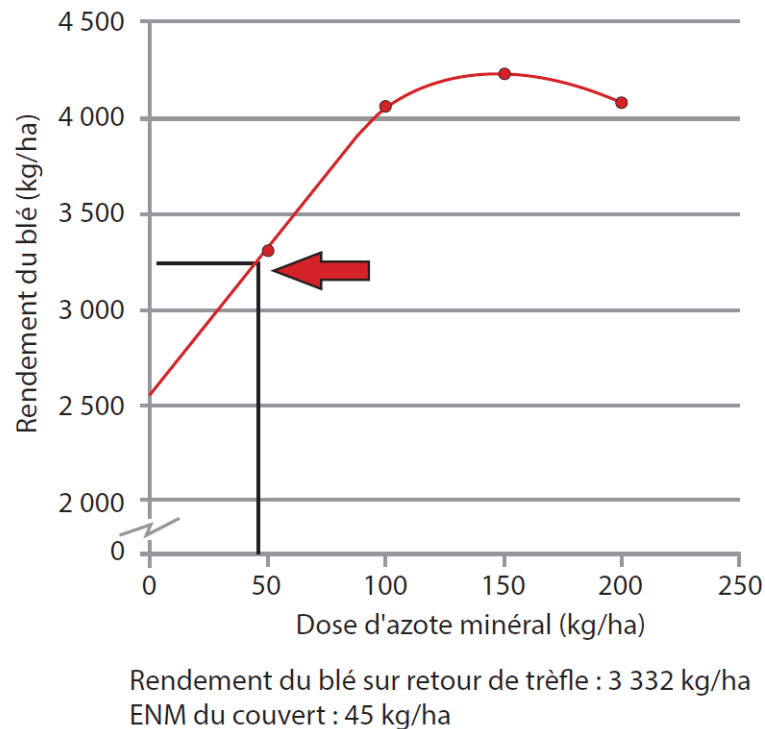


Figure 5.1 Calcul de l'ENM d'une CC de trèfles rouge et blanc pour une culture subséquente de blé
Source : Verville et Vanasse, non publié



Estimation des apports d'azote pour le maïs selon l'ENM

➤ Méta-analyse

- Études réalisées sous conditions tempérées
- Permettent de valider les quantités de N fournies par les CC
- Données complémentaires aux méthodes présentées précédemment

Équivalent en N minéral de différentes CC avant maïs

Tableau 5.2. Équivalent en azote minéral (ENM) de différentes espèces et systèmes de cultures de couverture précédant une culture de maïs

Espèces de CC	Système de CC	ENM moyen (kg N/ha) ¹	Intervalle de confiance ²
Légumineuses	Tous systèmes confondus	86 A	69 -100
	En dérobée	90 A	67-114
	Intercalaire	78 A	54-102
	Pleine saison	102 a	59-145
Mélanges avec légumineuses	Tous systèmes confondus	57 B	39-79
	En dérobée	59 ab	21-97
Non-légumineuses	En dérobée	34 B	2-66
Graminées	En dérobée	- 4 C ³	-21 ³ - 13

Lien entre le contenu en N de la biomasse aérienne des CC et l'ENM dans le maïs

Tableau 5.3. Lien entre la quantité d'azote accumulée dans la biomasse aérienne du couvert de légumineuses et de mélanges avec légumineuses et l'équivalent en azote minéral (ENM moyen) dans le maïs

Contenu en N dans le couvert végétal (kg N/ha)		ENM moyen (kg N/ha)	Intervalle de confiance ¹
< 50	Légumineuses	51	24 - 79
50 – 99	Légumineuses	71	48 – 94
100 - 199	Légumineuses	91	68 – 113
	Mélanges avec légumineuses	65	33 – 97
≥200	Légumineuses	111	65 – 157
	Mélanges avec légumineuses	85	17 - 153

1 : Intervalle de confiance à 95 % (on peut être sûr à 95 % que l'ENM se situe entre la limite inférieure et la limite supérieure).

Source : Vanasse et coll., 2017

Lien entre le contenu en N de la biomasse aérienne des CC et l'ENM (maïs)

- Contenu en N élevé et CC de légumineuses pures : donne le plus de N
- Valeurs d'ENM plus élevées que les valeurs calculées avec les coefficients de minéralisation
 - Biomasse racinaire (et nodules)?
 - Saison plus longue pour du maïs que des céréales?
- Indique que les calculs des coefficients de minéralisation (tableau 5.1) sont assez conservateurs
- Si les conditions de sol et de climat sont bonnes, on pourrait utiliser un coefficient plus élevé.

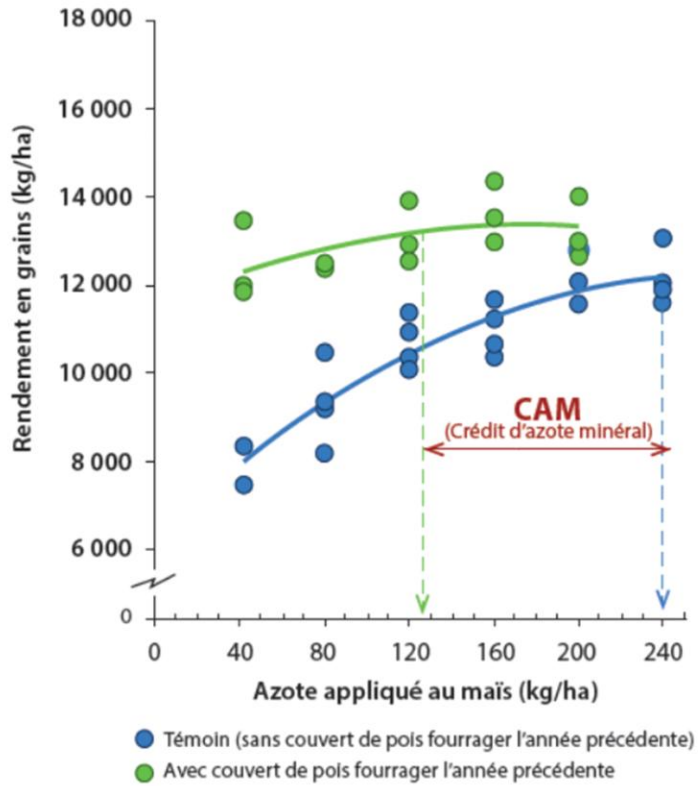


5.2.3 Essais expérimentaux à la ferme



- Les essais répétés sur une même ferme permettent de préciser la valeur fertilisante des CC dans des conditions de sol et de climat précises.
- Les résultats peuvent varier d'une année à l'autre et d'un champ à l'autre.

Essais expérimentaux à la ferme



Calculs simplifiés : faits avec rendements maximaux plutôt qu'économiques

Avec CC : 125 kg de N pour obtenir 13 t/ha

Sans CC : 240 kg de N pour obtenir 12 t/ha

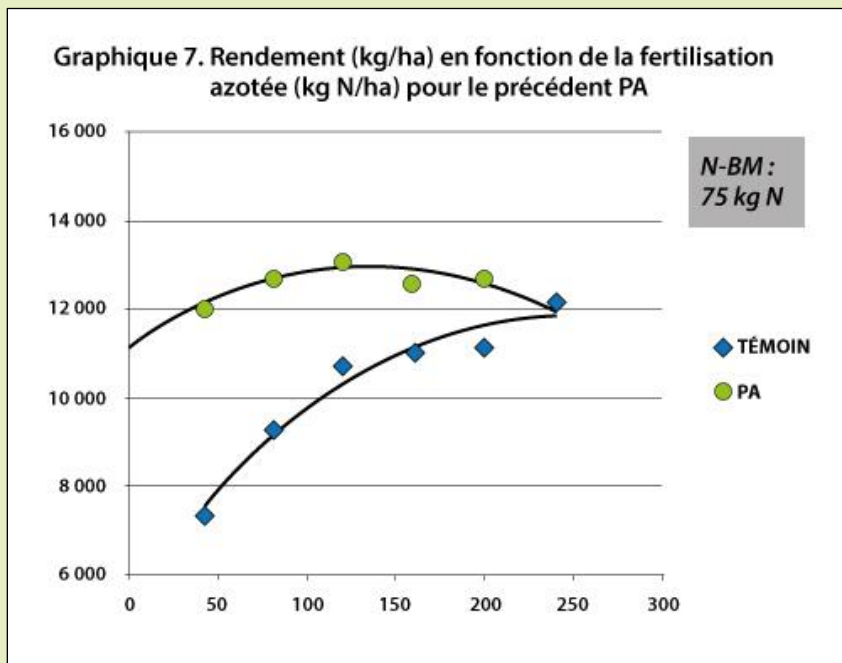
« **Crédit d'azote minéral (CAM)** » = effet de l'apport de N de la CC + effet de la CC sur la qualité du sol

Note : il y a plusieurs façons de définir le crédit d'azote, notamment en utilisant les rendements économiques plutôt que maximaux.

Figure 5.4. Effet d'un couvert de pois fourrager (en dérobée) sur le rendement du maïs selon différentes fertilisations azotées (Montérégie) Source : Carl Bérubé (données personnelles)

Chapitre 5 - EXERCICE 3

- a) Quel est le crédit d'azote minéral dans le graphique suivant?
- b) Que pensez-vous de ces résultats?



Notes : N-BM = N total dans la biomasse; PA = pois autrichien

Témoin : Maïs *sans* CC de pois autrichien l'année précédente

PA : Maïs *avec* CC de pois autrichien l'année précédente

Source : Bérubé et Tremblay. 2016. *Implantation à la dérobée de légumineuses annuelles dans les céréales pour améliorer la santé des sols et le rendement des cultures*. Rapport d'étape Prime-Vert.



5.3 Effet du contenu en azote des couverts végétaux sur le rendement du maïs

Effet du contenu en N des couverts végétaux sur le rendement du maïs

- Si **N des CC ≤ 50 kg N/ha**
 - pas d'effet sur le rendement subséquent du maïs (rapport de rendement = 1)
- Si **N des CC ≥ 50 kg N/ha**
 - le rapport de rendement augmente au fur et à mesure que N augmente (voir figure 5.3)
- **À retenir** : pour avoir un effet tangible sur le rendement d'une culture, la CC doit se développer suffisamment (biomasse et azote), bien qu'il soit possible que de petites biomasses se traduisent par des augmentations de rendement.

Effet du contenu en N des couverts végétaux sur le rendement du maïs

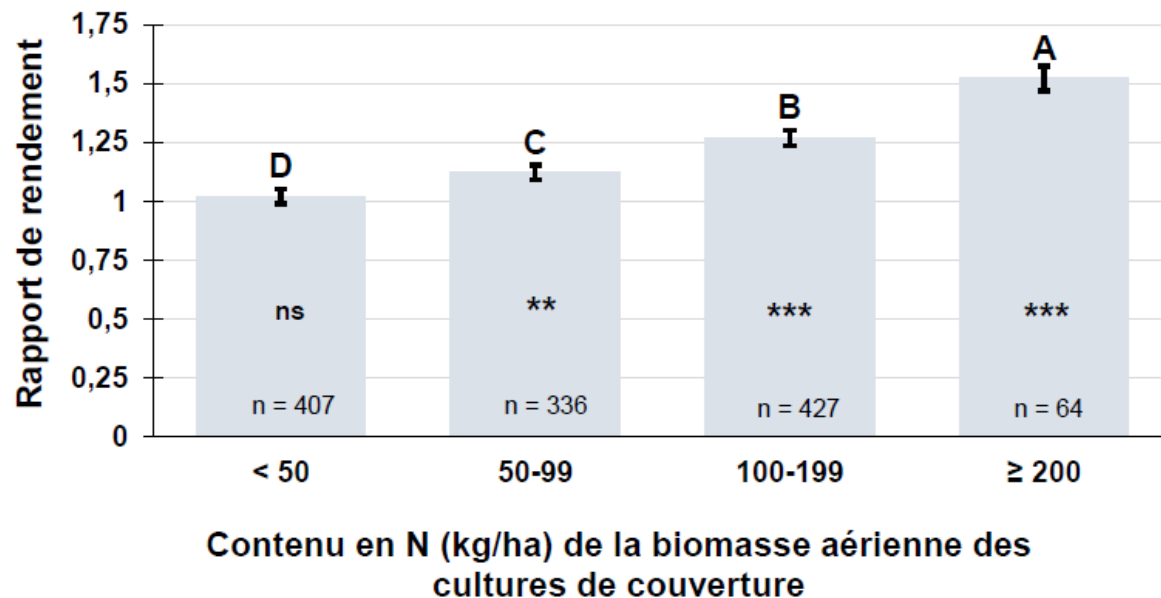


Figure 5.3 Effet du contenu en N des CC sur le rendement du maïs

Rapport de rendement = rendement du maïs précédé d'une CC/rendement du maïs sans CC

Les rapports de rendement partageant une même lettre majuscule ne sont pas significativement différents. | n.s. : non significatif, * significatif à $P < 0,05$, ** significatif à $P < 0,01$, *** significatif à $P < 0,001$

n : nombre d'observations

Source : Vanasse et coll., 2017



5.4 Effet modulateur de la fertilisation azotée

5.4.1 Légumineuses

5.4.2 Mélanges

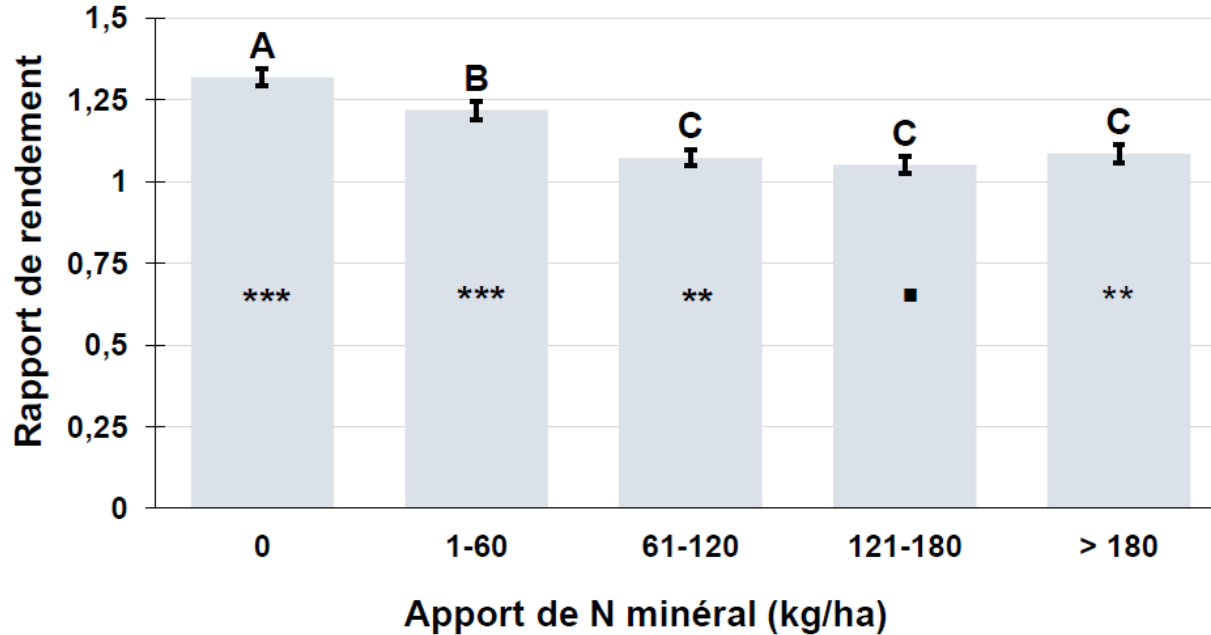
5.4.3 Graminées

5.4.4 Non-légumineuses
autres que les graminées

➤ À retenir :

- La réponse du maïs à l'apport d'azote de la CC est modulée par le niveau de fertilisation du maïs.
- En général, plus on ajoute de l'azote minéral, moins la réponse aux CC est importante.
- Les résultats diffèrent selon les familles de CC.

5.4.1 Légumineuses



Avec 0 N :
rendement + **32 %**

Avec 60 kg N /ha :
rendement + **22 %**

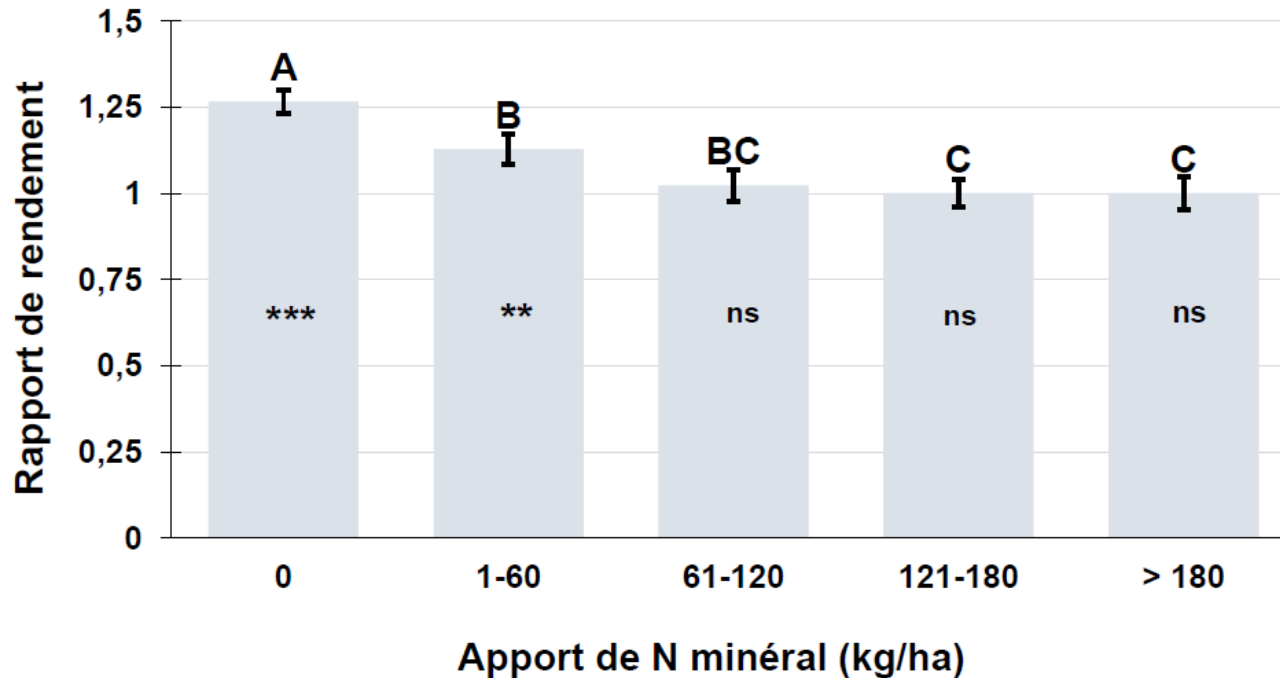
Plus de 60 kg N/ha :
rendement + **5 à 9 %**

Plus on applique d'azote minéral, moins l'augmentation de rendement est importante.

Figure 5.4a Modulation de l'effet des types de CC sur le rendement du maïs par la fertilisation azotée

Source : Vanasse et coll., 2017

5.4.2 Mélanges (légumineuses + non-légumineuses)



Avec 0 N :
rendement + **27 %**

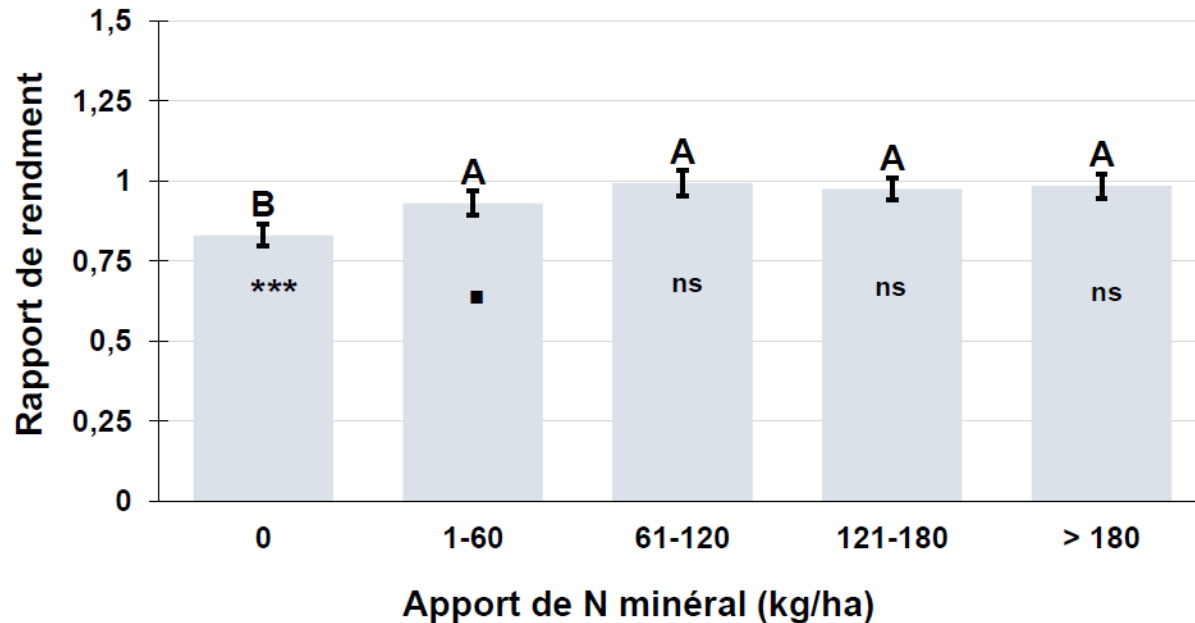
Plus de 60 kg N/ha :
rendement + **0 %**

*Plus on applique
d'azote minéral, moins
l'augmentation de
rendement est
importante*

**Figure 5.4b Modulation de l'effet des types de CC sur le rendement du maïs
par la fertilisation azotée**

Source : Vanasse et coll., 2017

5.4.3 Graminées



Avec 0 N :
rendement – **17 %**

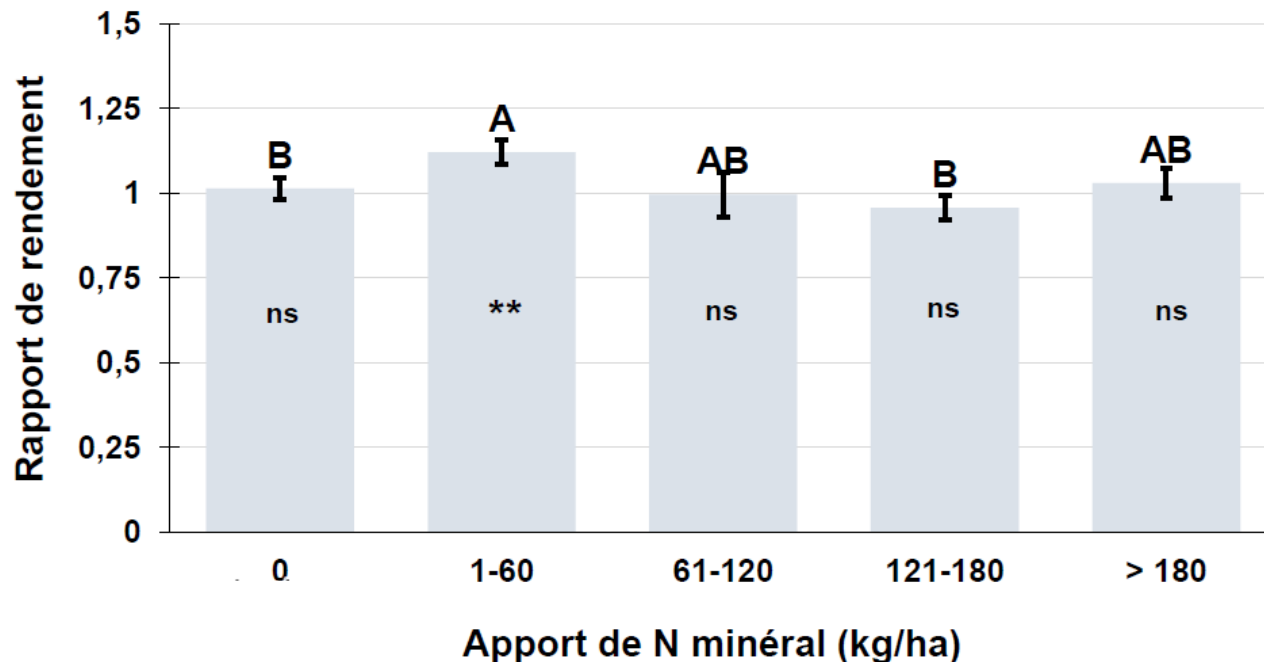
Compensé avec des apports
d'azote compris entre 60 et
180 kg N/ha

*Attention : Résultats surtout
issus des études avec le
seigle*

**Figure 5.4c Modulation de l'effet des types de CC sur le rendement du maïs
par la fertilisation azotée**

Source : Vanasse et coll., 2017

5.4.4 Non-légumineuses autres que les graminées



Très peu d'effet

Impossible de tirer
une conclusion

Peu d'observations
pour cette catégorie

**Figure 5.4d Modulation de l'effet des types de CC sur le rendement du maïs
par la fertilisation azotée**

Source : Vanasse et coll., 2017

Fin du chapitre 5
Suite du Jour 4 au chapitre 7

Des questions?

