

Rapport final

No projet : IA214152

Titre : Méta-analyse sur la contribution des cultures de couverture à la dynamique de l'azote, à la qualité des sols et aux rendements des grandes cultures

Responsable scientifique : Anne Vanasse

Établissement : Université Laval

Date de remise : décembre 2017

Section 1 - Chercheurs impliqués et responsable autorisé de l'établissement (ces personnes doivent également faire parvenir un courriel pour attester qu'ils ont lu et approuvent le rapport.)

- Anne Vanasse, agr., Ph.D., professeure titulaire, Université Laval, Québec
- Nicolas Tremblay, Ph.D., chercheur, Agriculture et Agroalimentaire Canada, St-Jean-sur – Richelieu
- Janice L. Bailey, Ph.D. (responsable autorisé de l'établissement) : vice-doyenne à la recherche, Université Laval, Québec

Section 2 – Partenaires

- Le réseau Innovagrains a contribué à la réalisation du projet par une contribution financière de 15 000\$ et par la participation en temps de la coordonnatrice du réseau (Valérie Bélanger) aux différentes étapes du projet.
- Le groupe, Grain Farmers of Ontario (GFO), association de producteurs de cultures commerciales de l'Ontario a donné un montant de 45 000 \$ afin de rassembler les données sur les CC, non seulement au Québec mais aussi au Canada (Ontario, Maritimes, Ouest), aux États-Unis et en Europe. Ce financement était donc complémentaire au projet proposé.

Section 3 – Fiche de transfert (max 2 pages)

Contribution des cultures de couverture aux rendements des grandes cultures, à la dynamique de l'azote et à la qualité des sols

Anne Vanasse, Anaïs Charles et Nicolas Tremblay

No de projet : (réservé à l'administration)

Durée : 09/2014 – 09/2016

FAITS SAILLANTS

Les cultures de couverture (CC) présentent plusieurs bénéfices liés à la réduction de l'érosion, à l'amélioration de la qualité des sols et à l'apport d'éléments nutritifs pour les cultures subséquentes. Des augmentations de rendement de 16 à 22 % peuvent être rencontrées dans le maïs et les céréales qui sont ensencés suite aux CC. Les légumineuses (seules ou en mélange) offrent de meilleures performances que les graminées ou crucifères pour l'apport potentiel en azote et l'augmentation subséquente des rendements. Toutefois, les graminées sont plus efficaces que les légumineuses à augmenter le carbone organique du sol. Les graminées et crucifères seront aussi plus efficaces pour réduire les teneurs en azote résiduel à l'automne et diminuer le lessivage des nutriments vers les cours d'eau.

OBJECTIF(S) ET MÉTHODOLOGIE

L'objectif du projet est de préciser les effets des CC sur : a) les rendements des grandes cultures, b) la dynamique de l'azote et c) la qualité des sols par le biais de la méta-analyse. Pour ce faire, un recensement des études dans la littérature scientifique et un rassemblement des données non-publiées provenant du Canada et des États-Unis ont été effectués. La méta-analyse servant aux objectifs a et b repose sur les résultats de 139 essais expérimentaux provenant de 67 articles scientifiques et de 20 rapports de recherche. Pour l'objectif c, une revue de littérature exhaustive a été effectuée. Nous avons déterminé une liste de variables explicatives (pratiques culturales, climat, sols, etc.) et de variables réponses (rendement de la culture, production de biomasse de la CC, contenu en N de la CC, etc.). Plus de 200 variables ont été listées en vue de leur intégration dans la base de données. Des analyses multivariées et univariées ont été effectuées afin de préciser les effets des types de CC (légumineuses, graminées, autres), des systèmes (en dérobée, intercalaire, pleine saison) et des facteurs pédo-climatiques sur le rendement des cultures et les apports potentiels en azote des CC.

RÉSULTATS SIGNIFICATIFS POUR L'INDUSTRIE

Effets des CC sur le rendement des cultures

- L'effet global des CC (tous types de CC confondus) est significatif dans la production de maïs et de céréales avec des augmentations respectives de rendements de 16 % et de 22 % pour ces cultures. Au contraire, la présence de CC n'a pas d'effet significatif sur le rendement du soya.
- Les CC légumineuses (seules ou en mélange) offrent de meilleures performances que les CC graminées ou non légumineuses (crucifères) avec une moyenne de 20 % d'augmentation de rendement du maïs. Les graminées ont un léger effet négatif avec une diminution de 4 % sur les rendements du maïs mais cet effet s'annule avec une fertilisation azotée de plus de 60 kg N/ha appliquée dans le maïs.
- Au fur et à mesure que la fertilisation azotée du maïs augmente, l'effet des légumineuses sur le rendement diminue jusqu'à atteindre un plateau. Ainsi, avec une fertilisation azotée de 60 unités et moins, les légumineuses vont encore augmenter le rendement du maïs de 19 %, cet effet s'estompant pour atteindre des valeurs entre 6 et 12 % selon les doses apportées (entre 60 et 180 N).
- La teneur en matière organique du sol va aussi moduler la réponse d'une culture à l'effet des CC. Dans le maïs, ce sont les sols qui ont une faible teneur en matière organique (< 2 %) qui répondront le plus à l'effet des CC.
- Dans les régions à faibles précipitations (500 mm), les légumineuses, seules ou en mélanges, permettent des augmentations de rendement du maïs alors que les graminées ont un effet négatif sur le

rendement. Dans les régions aux précipitations plus élevées, l'effet négatif des graminées s'annule.

- Les céréales ont une réponse assez similaire au maïs, montrant des augmentations de rendement de 19 à 27 % suite à des légumineuses, seules ou en mélange. Les graminées n'ont aucun effet alors que les crucifères ont un effet positif sur le rendement des céréales avec une augmentation de 16 %.
- Une augmentation des rendements des céréales (de 8 % à 38 %) est observée au fur et à mesure que les précipitations augmentent pour les régions avec un indice de plus de 800 mm.

Effets des CC sur la dynamique de l'azote

- Pour l'ensemble des cultures (maïs et céréales), les mélanges légumineuses/non-légumineuses et les légumineuses seules se distinguent clairement, en accumulant respectivement 91 kg N/ha et 74 kg N/ha dans leur biomasse aérienne, alors que les graminées et crucifères accumulent une moyenne de 30 unités d'azote. Pour le maïs seulement, les mélanges avec légumineuses et les légumineuses seules, accumulent respectivement 115 kg N/ha et 95 kg N/ha, les graminées 22 kg N/ha et les crucifères 33 kg N/ha.
- En texture grossière, les légumineuses seules ou en mélange, performant mieux que les graminées et crucifères. En texture moyenne, cette différence entre les légumineuses et les graminées et crucifères persiste alors qu'elle s'atténue de façon importante dans les sols à texture fine, qui sont naturellement plus fertiles et retiennent davantage l'eau que les sols à texture grossière.
- L'équivalent en azote minéral (ENM) des légumineuses atteint une moyenne de 86 kg N/ha pour le maïs (sans fertilisation), l'apport d'azote étant similaire entre les deux systèmes d'implantation, en dérobée ou en intercalaire. Cet équivalent d'azote varie de 24 à 157 kg N/ha selon la quantité d'azote accumulée dans la biomasse aérienne de la CC légumineuse (moins de 50 kg N/ha à plus de 200 kg N/ha). Les ENM du trèfle rouge, de la vesce velue, de la luzerne et du mélange vesce velue/seigle sont respectivement de 79, 78, 62 et 52 kg N/ha.

Effets des CC sur la qualité du sol

- Les CC ont des effets bénéfiques sur la qualité des sols. Elles peuvent augmenter la matière organique du sol à long terme (> 3 ans) mais cet effet est lié à plusieurs facteurs tels que le nombre d'années avec CC, la biomasse aérienne et racinaire des CC, le type de sol, le travail du sol et le climat.
- Les CC augmentent l'activité biologique du sol et semblent améliorer rapidement (< 3 ans) l'agrégation du sol. Elles peuvent aussi augmenter l'infiltration de l'eau et réduire l'érosion hydrique et le ruissellement de surface des sédiments.
- Enfin, les CC de graminées et de crucifères peuvent prélever entre 20 et 60 unités d'azote en post-récolte alors que les CC qui persistent durant l'hiver peuvent réduire le lessivage de l'azote entre 40 et 70 % par rapport à un sol nu.

APPLICATIONS POSSIBLES POUR L'INDUSTRIE ET/OU SUIVI À DONNER

Cette étude aura permis de préciser les effets des CC sur la qualité des sols, sur les augmentations de rendement possible ainsi que sur les apports potentiels en azote des CC légumineuses.

POINT DE CONTACT POUR INFORMATION

Nom du responsable du projet : Anne Vanasse
Téléphone : (418) 656-2131 (poste 12262)
Télécopieur : (418) 656-7856
Courriel : anne.vanasse@fsaa.ulaval.ca

REMERCIEMENTS AUX PARTENAIRES FINANCIERS

Ces travaux ont été réalisés grâce à une aide financière du Programme de soutien à l'innovation en agroalimentaire, un programme issu de l'accord du cadre Cultivons l'avenir conclu entre le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation et Agriculture et Agroalimentaire Canada.

Section 4 - Activité de transfert et de diffusion scientifique (joindre en annexe la documentation en appui)

1. Anaïs Charles, Anne Vanasse, Laura Van Eerd, Nicolas Tremblay, Gaétan Bourgeois and Derek Lynch. 2016. Meta-analysis of cover cropping systems under organic and conventional management: the effects of cover crops on subsequent cash crop yields and nitrogen contribution. Conférence donnée dans le cadre du « Canadian Organic Science Conference », 19-21 septembre, Longueuil, Québec. (document 1)
2. Anaïs Charles, Laura Van Eerd, Nicolas Tremblay, Gaétan Bourgeois, Derek Lynch and Anne Vanasse. 2016. Meta-analysis of cover cropping systems: the effects of cover crops on subsequent cash crop yields. Conférence donnée dans le cadre du Congrès de la Société Canadienne d'agronomie. 24-26 juillet 2016. Montréal, Québec. (document 2)
3. Anne Vanasse, Anaïs Charles, Laura Van Eerd, Nicolas Tremblay, Gaétan Bourgeois et Derek Lynch. 2016. Méta-analyse sur les cultures de couverture: effets sur le rendement des grandes cultures. Conférence présentée dans le cadre de la journée d'information scientifique du Centre SÈVE. 24 novembre 2016.
4. Anne Vanasse, Anaïs Charles, Laura Van Eerd, Nicolas Tremblay, Gaétan Bourgeois et Derek Lynch. 2017. Méta-analyse sur les cultures de couverture: effets sur le rendement et la dynamique de l'azote. Conférence présentée au congrès annuel de l'AQSSS. Trois-Rivières, Québec, 30 mai-1^{er} juin 2017.
5. Anaïs Charles, Anne Vanasse, Laura Van Eerd, Nicolas Tremblay, Gaétan Bourgeois and Derek Lynch. 2017. Meta-analysis of cover cropping systems: the effects of cover crops on subsequent cash crop yields and nitrogen contribution. Affiche scientifique présentée au congrès américain ASA/CSSA/CSA, Tampa Bay, É.U. 23-25 Octobre 2017.

Section 5 - Activités de diffusion et de transfert aux utilisateurs (joindre en annexe la documentation en appui)

1. Anne Vanasse, 2016. Bénéfices des cultures de couverture dans les systèmes de production. Conférence donnée dans le cadre du Congrès annuel de l'Ordre des agronomes : Changements climatiques : réflexions et actions agronomiques. 15-16 septembre 2016, Québec, Québec. (document 3)
2. Anaïs Charles, Laura Van Eerd et Anne Verhallen, 2017. Cover crop science and reality. Conférence présentée lors de la journée d'information sur les grandes cultures en Ontario. The 2017 Southwest Agricultural Conference, 4-5 janvier 2017. Ridgeway, Ontario.
3. Anne Vanasse, Anaïs Charles, Laura Van Eerd, Nicolas Tremblay, Gaétan Bourgeois et Derek Lynch. 2017. Bénéfices des cultures de couverture : résultats d'une méta-analyse. Conférence présentée dans le cadre de la journée d'information sur les grandes cultures organisée par le CRAAQ. 23 février 2017. Drummondville, Québec.
4. Anne Vanasse, Anaïs Charles, Laura Van Eerd, Nicolas Tremblay, Gaétan Bourgeois et Derek Lynch. 2017. Bénéfices des cultures de couverture : résultats d'une méta-analyse. Conférence présentée dans le cadre de la journée d'information sur les engrais verts organisée par les clubs-conseils de la Montérégie. 24 mars 2017. St-Bruno, Québec.
5. Anne Vanasse, Anaïs Charles, Laura Van Eerd, Nicolas Tremblay, Gaétan Bourgeois et Derek Lynch. 2017. Bénéfices des cultures de couverture : résultats d'une méta-analyse. Conférence présentée dans le cadre des conférences d'Agriculture et Agroalimentaire Canada. Québec, Québec. 20 avril 2017.
6. Anne Vanasse, Anaïs Charles, Laura Van Eerd, Nicolas Tremblay, Gaétan Bourgeois et Derek Lynch. 2017. Résultats d'une méta-analyse sur les engrais verts. Conférence présentée à la journée d'information de Semis direct Estrie. Sherbrooke, Québec. 17 novembre 2017.
7. Anne Vanasse, Anaïs Charles, Laura Van Eerd, Nicolas Tremblay, Gaétan Bourgeois et Derek Lynch. 2017. Cultures de couverture : synthèse des études et applications pratiques. Conférence présentée aux journées horticoles et grandes-cultures. St-Rémi, Québec. 5 décembre, 2017.
8. Anne Vanasse, Anaïs Charles, Laura Van Eerd, Nicolas Tremblay, Gaétan Bourgeois et Derek Lynch. 2017. Cultures de couverture : synthèse des études et applications pratiques. Conférence présentée à la journée Grandes cultures Agri-Vision. St-Hyacinthe, Québec. 6 décembre, 2017.

Autres présentations faites sur le sujet des cultures de couverture :

9. Anne Vanasse, 2016. Bénéfices et effets des engrais verts sur le rendement des cultures. Conférence donnée aux producteurs membres du Club-conseil Yamasol, lors de leur journée d'information. 19 août 2016. La-Visitation-de-Yamaska, Québec. (document 4)

10. Anne Vanasse, 2016. Effet des rotations et des engrais verts sur la fertilisation et les rendements des cultures. Conférence donnée dans le cadre du Colloque Bio pour tous 2016. 16 mars 2016. Drummondville, Québec. (document 5)
11. Anne Vanasse, 2016. Effet des engrais verts sur les apports en azote et le rendement des cultures. Conférence donnée aux producteurs membres du Club de fertilisation de la Beauce. 21 janvier 2016. Ste-Hénédine, Québec. (document 6)
12. Anne Vanasse, 2017. Engrais verts dans la rotation. Affiche de vulgarisation présentée dans une activité de démonstration au champ organisée par le MAPAQ. Lac St-Jean. Québec. 13 juillet 2017.
13. Anne Vanasse, 2017. Bénéfices des engrais verts et effets sur le rendement des cultures. Conférence donnée à la Journée sol et semences du Club Fertior. St-Bernard, Québec. 21 septembre 2017.
14. Anne Vanasse, 2017. La rotation avec les céréales d'automne et les engrais verts : une combinaison gagnante. Conférence donnée à la Journée d'information de Semican. Québec, Québec. 11 octobre 2017.
15. Anne Vanasse, 2017. La rotation avec les céréales d'automne et les engrais verts : une combinaison gagnante. Conférence donnée à la Journée d'information de Yamasol. Nicolet, Québec. 15 décembre 2017.
16. Anne Vanasse, 2017. Engrais verts, intercalaires et rotations. Conférence donnée à l'atelier d'information pour le réseau Coop et Agrocentre. Drummondville, Québec. 19 décembre 2017.

Section 6 – Grille de transfert des connaissances

1. Résultats Présentez les faits saillants (maximum de 3) des principaux résultats de votre projet.	2. Utilisateurs Pour les résultats identifiés, ciblez les utilisateurs qui bénéficieront des connaissances ou des produits provenant de votre recherche.	3. Message Concrètement, quel est le message qui devrait être retenu pour chacune des catégories d'utilisateurs identifiées? Présentez un message concret et vulgarisé. Quels sont les gains possibles en productivité, en rendement, en argent, etc.?	4. Cheminement des connaissances a) Une fois le projet terminé, outre les publications scientifiques, quelles sont les activités de transfert les mieux adaptées aux utilisateurs ciblés? (conférences, publications écrites, journées thématiques, formation, etc.) b) Selon vous, quelles pourraient être les étapes à privilégier en vue de maximiser l'adoption des résultats par les utilisateurs.
Effets des CC sur le rendement des cultures subséquentes : - Quantification de l'augmentation de rendement des grandes cultures (maïs, céréales, soya) suite à l'établissement de CC selon différents modes (en dérobée, intercalaire ou pleine saison) - Précision des facteurs influençant le rendement suite aux CC.	Chercheurs, Conseillers, Producteurs agricoles et étudiants	- Augmentation de rendement de 21% du maïs et de 27 % des céréales suite à des CC légumineuses et de 16 % (maïs) et 19 % (céréales) suite à un mélange légumineuse/non légumineuse - Pas d'effet des CC non-légumineuses et des graminées sur le rendement moyen des cultures mais différence entre le maïs et les céréales. - Pas d'effet des CC sur le rendement du soya. - La fertilisation azotée, la teneur en matière organique et les précipitations vont moduler les effets des CC sur le rendement des cultures.	a) <u>Chercheurs et étudiants</u> : publications scientifiques, conférences <u>Conseillers agricoles</u> : conférences et feuillets techniques. Un chapitre du prochain guide de fertilisation sera consacré aux cultures de couverture. Plusieurs de ces résultats vont se retrouver dans ce chapitre. Il pourrait y avoir de la formation ciblée pour les conseillers. <u>Producteurs agricoles</u> : conférences, journée thématique sur les CC et journées de démonstration au champ. b) Les résultats de la méta-analyse seront partagés au sein de la Commission des sols du CRAAQ afin de définir une stratégie quant à la diffusion de ces résultats (chapitre du guide). Toutefois, il faudra attendre de bien compléter les travaux d'analyse qui vont se poursuivre jusqu'en mai 2017 (fin du projet financé par GFO).
Effets des CC sur la dynamique de l'azote : - Quantification des apports potentiels d'azote provenant des CC et des équivalents en azote minéral des légumineuses. - Précision des facteurs influençant la dynamique de l'azote.	Chercheurs, Conseillers, Producteurs agricoles et étudiants	- Apports potentiels d'azote des légumineuses, seules ou en mélange, variant entre 74 et 91 kg N/ha. - Équivalent en azote minéral (ENM) moyen des légumineuses de 86 kg N/ha pour le maïs (sans fertilisation). - La durée de croissance, la texture du sol et les précipitations influencent les quantités accumulées d'azote dans la biomasse aérienne des CC.	a) <u>Chercheurs et étudiants</u> : publications scientifiques, conférences <u>Conseillers agricoles</u> : conférences et feuillets techniques. Un chapitre du prochain guide de fertilisation sera consacré aux cultures de couverture. Plusieurs de ces résultats vont se retrouver dans ce chapitre. Il pourrait y avoir de la formation ciblée pour les conseillers. <u>Producteurs agricoles</u> : conférences, journée thématique sur les CC et journées de démonstration au champ c) Les résultats de la méta-analyse seront partagés au sein de la Commission des sols du CRAAQ afin de définir une stratégie quant à la diffusion de ces résultats (chapitre du guide). Toutefois, il faudra attendre de bien compléter les travaux d'analyse qui vont se poursuivre jusqu'en mai 2017 (fin du projet financé par GFO).

<p>Effets des CC sur la qualité des sols :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Effets sur la matière organique du sol et facteurs d'influence - Effets sur les propriétés physiques (agrégats) et biologiques du sol - Impact sur la compaction du sol, les propriétés hydrauliques, l'érosion hydrique et le lessivage de l'azote dans le sol 	<p>Chercheurs, Conseillers, Producteurs agricoles et étudiants</p>	<ul style="list-style-type: none"> -Les CC peuvent augmenter la matière organique du sol à long terme mais cet effet est lié à plusieurs facteurs (nombre d'années, biomasse aérienne et racinaire, type de sol, travail du sol et climat) -Les CC augmentent l'activité biologique du sol et peuvent augmenter la stabilité des agrégats et l'agrégation du sol. - Les CC peuvent augmenter l'infiltration de l'eau et réduire l'érosion hydrique et le ruissellement de surface des sédiments. -Les CC de graminées et de crucifères peuvent réduire la teneur en azote résiduel du sol à l'automne et réduire le lessivage de l'azote vers les cours d'eau. 	<p>a) <u>Chercheurs et étudiants</u> : publications scientifiques, conférences <u>Conseillers agricoles</u> : conférences et feuillets techniques. Un chapitre du prochain guide de fertilisation sera consacré aux cultures de couverture. Plusieurs de ces résultats vont se retrouver dans ce chapitre. Il pourrait y avoir de la formation ciblée pour les conseillers. <u>Producteurs agricoles</u> : conférences, journée thématique sur les CC et journées de démonstration au champ</p> <p>b) Les résultats de la méta-analyse seront partagés au sein de la Commission des sols du CRAAQ afin de définir une stratégie quant à la diffusion de ces résultats (chapitre du guide). Toutefois, il faudra attendre de bien compléter les travaux d'analyse qui vont se poursuivre jusqu'en mai 2017 (fin du projet financé par GFO).</p>
--	--	--	--

Section 7 - Contribution et participation de l'industrie réalisées

Le groupe, Grain Farmers of Ontario (GFO), association de producteurs de cultures commerciales de l'Ontario a donné un montant de 45 000 \$ afin de rassembler les données sur les CC, non seulement au Québec mais aussi au Canada (Ontario, Maritimes, Ouest), aux États-Unis et en Europe. Ce financement était donc complémentaire au projet proposé.

Section 8 - Rapport scientifique et/ou technique (format libre réalisé selon les normes propres au domaine d'étude)

1. Objectif du projet

L'objectif général est de préciser les effets des cultures de couverture (légumineuses et non-légumineuses) sur les rendements des grandes cultures, la dynamique de l'azote et la qualité des sols par le biais de la méta-analyse.

Trois objectifs spécifiques ont donc été définis et traités séparément afin de quantifier l'effet des cultures de couverture (CC) sur :

Objectif A) les rendements des grandes cultures;

Objectif B) la dynamique de l'azote dans le système sol-plante;

Objectif C) la qualité des sols et les effets des CC sur les propriétés hydrauliques et le lessivage de l'azote

La méta-analyse nécessite plusieurs étapes que nous allons résumer ci-dessous en décrivant l'ensemble des actions et en y indiquant, s'il y a lieu, certaines particularités propres aux différents objectifs spécifiques.

2. Méthodologie

2.1. Recensement des études dans la littérature scientifique et classement des études selon les différentes variables explicatives en préparation pour le fichier de la méta-analyse

En premier lieu, des critères spécifiques d'inclusion ont été établis afin de retenir les études qui correspondaient le mieux possible à nos objectifs et notre situation géographique.

Critères d'inclusion :

1 – *Secteur visé*: grandes cultures

2 – *Système de production*: présence de cultures de couverture (CC): en dérobée, intercalaire ou de pleine saison et cultures commerciales annuelles suivant l'année de la CC (pour l'objectif A)

3 – *Cultures commerciales*: maïs, soya et céréales de printemps ou d'automne

4 – *Traitement de contrôle*: présence d'un traitement sans cultures de couverture (pour les objectifs A et B)

5 – *Plan d'expérience*: au moins deux répétitions de chaque traitement

6 – *Situation géographique*: climat tempéré humide; régions de l'Amérique du Nord situées approximativement entre le 40^{ème} et 50^{ème} parallèle et régions de l'Europe situées approximativement entre le 45^{ème} et le 60^{ème} parallèle et où le climat est assez similaire à celui de l'Est du Canada.

Pour les systèmes de production, les trois classes de CC peuvent se définir ainsi. Les CC de pleine saison sont mis en place pendant une saison de culture complète pendant laquelle aucune culture principale n'est cultivée, tandis que les CC en dérobée sont semées après la récolte d'une culture principale et vont effectuer leur cycle du semis à l'arrêt de leur croissance dans la fenêtre qui est disponible. Enfin, les CC en intercalaire sont semées, soit simultanément avec une culture principale, soit directement dans une culture principale déjà établie. Celle-ci est alors récoltée de façon à épargner la CC après quoi la croissance de la CC se poursuit.

Dans la présentation des résultats, les CC seront souvent regroupées par type de CC, soit les légumineuses, les mélanges légumineuses/non légumineuses, les graminées et les autres CC non légumineuses qui comprennent majoritairement des crucifères.

Nous avons déterminé une liste de variables explicatives (exemple: pratiques culturales, caractéristiques du climat ou des sols, etc.) et de variables réponses (rendement de la culture, production de biomasse de la CC, contenu en N de la CC, etc.). Plus de 200 variables ont été listées en vue de leur intégration dans la base de données. Un résumé de ces variables est présenté à l'annexe A.

Le recensement des études publiées dans la littérature scientifique a été effectué jusqu'au début de juillet 2015 à l'aide de la base de données de CAB Abstracts (de 1910 à 2015) en utilisant les mots-clés précisés à l'Annexe B. Pour les objectifs A et B, 668 documents ont été retenus à partir de la recherche initiale. Après avoir vérifié l'adéquation de ces études avec nos critères d'inclusion, nous avons identifié 141 études dont plus de la moitié répondaient conjointement aux deux objectifs (Annexe C). Par conséquent, en 2015, nous avons raffiné les critères d'inclusion afin d'inclure prioritairement dans la méta-analyse les études qui répondaient à l'objectif A et de relever les données pertinentes à l'objectif B lorsque présentes. Seules ont été incluses les

moyennes des articles qui n'étaient pas cumulées sur plusieurs années, ni plusieurs sites ou doses d'azote afin de pouvoir mettre efficacement en relation les effets des CC aux différents facteurs pédo-climatiques et agronomiques. Au final, la méta-analyse repose donc sur 2518 observations faites sur les CC provenant de 139 sites expérimentaux et publiés dans 67 articles scientifiques et 20 rapports de recherche (Annexe C). Les autres articles pertinents mais non retenus pour la méta-analyse ont été conservés aux fins de discussion des résultats et sont listés dans la section des références du présent document (Annexe C). Pour l'objectif C, étant donné les aspects méthodologiques hétérogènes des travaux, nous avons décidé de faire plutôt une revue de littérature basée sur 82 références (Annexe C).

2.2. Rassemblement des données non-publiées des études du Canada (Québec, Ontario, Maritimes, sites non arides de l'Ouest Canadien) et des États-Unis et classement en préparation pour le fichier de la méta-analyse

Après avoir contacté plusieurs chercheurs et intervenants de diverses organisations du Québec (AAC, Universités Laval et McGill, IRDA, CEROM, MAPAQ, CETAB, Clubs-conseils), de l'Ontario (AAC, Universités de Guelph, de Trent et de Waterloo, OMAFRA), des Maritimes (Université de Dalhousie) et des États-Unis (chercheurs du Michigan, Iowa, Indiana, Illinois, Ohio, Minnesota et Wisconsin), nous avons reçu les données non publiées de 49 études (rapports de recherche ou données compilées et analysées). Par contre, seulement 20 études ont rencontré les critères de la méta-analyse, soit 11 études de chercheurs québécois, 7 études ontariennes, 1 étude des Maritimes et 1 étude américaine (Annexe B).

La Figure 1 illustre la répartition mondiale des sites rapportés dans les études publiées et non publiées retenues pour l'objectif A de la méta-analyse (effet des CC sur les rendements) alors que la Figure 2 indique la répartition de ces mêmes sites mais au Québec seulement. Il y a 65 % des sites illustrés à la Figure 1 qui renseignent conjointement les objectifs A et B, tandis que pour le Québec, il s'agit de 85 % des sites illustrés à la Figure 2.

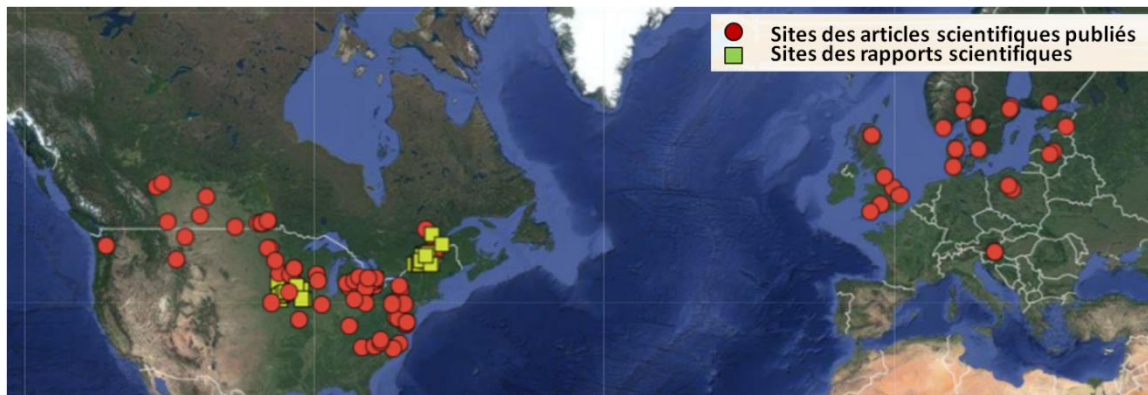


Figure 1. Cartographie mondiale des sites des études sélectionnées pour la méta-analyse

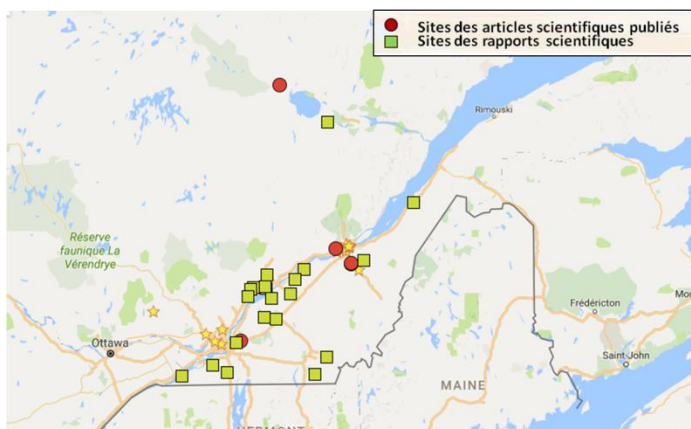


Figure 2. Cartographie des sites québécois des études sélectionnées pour la méta-analyse.

2.3. Création des fichiers de données de la méta-analyse en vue des analyses statistiques

L'entrée des données disponibles dans le fichier de la méta-analyse est une étape qui prend beaucoup de temps et de ressources. Comme il y avait plus de 200 variables à entrer par étude, ce fut un travail très considérable. Dans plusieurs études publiées, il a fallu extraire les données des figures avec la variabilité associée aux différentes données à l'aide du logiciel Engauge. Nous avons homogénéisé les entrées et procédé à des analyses exploratoires préalables aux modèles statistiques sophistiqués (Box plots, tableaux de synthèse). Les variables de réponse et les facteurs explicatifs compilés dans la base de données sont listés en Annexe A. Enfin, un nouveau collaborateur, Dr. Gaétan Bourgeois, a mis à notre disposition une base de données nationale qui a servi à compiler les données climatiques d'une centaine d'années-sites du Canada.

2.4. Répartition des années de publication et des espèces de CC selon le type et le système d'implantation

L'année de publication des 67 articles sélectionnés a varié entre 1977 et 2015 avec une grande partie des articles publiés après 1990, comme l'illustre la Figure 3. Plus de 80 espèces de CC sont représentées dans la base de données et ont été regroupées selon le type de CC (légumineuses, mélange avec légumineuses, graminées et autres non légumineuses) ou par système d'implantation (en dérobée, intercalaire ou de pleine saison). La Figure 4 illustre la répartition des espèces de CC selon les types et les systèmes d'implantation.

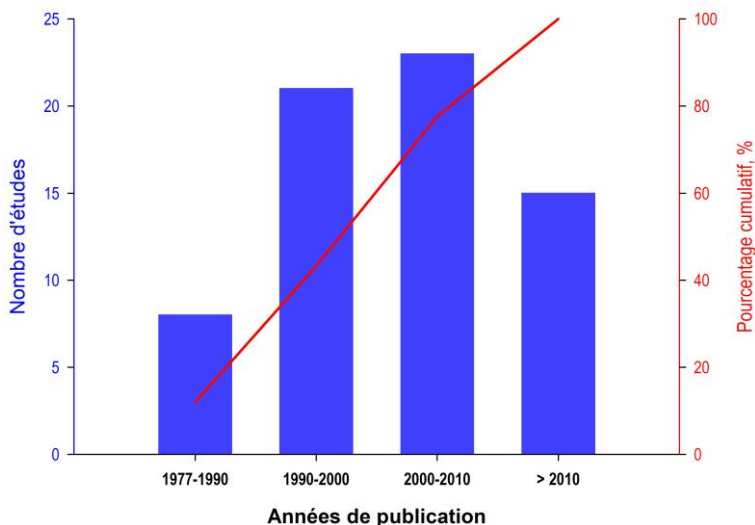


Figure 3. Distribution des articles scientifiques selon les années de publication

2.5. Analyse statistiques

Pour chaque variable à l'étude, une analyse de variance a été conduite sur chaque facteur explicatif d'intérêt à l'aide du logiciel SAS en utilisant un modèle linéaire mixte. Le modèle linéaire mixte adapté aux méta-analyses incluait l'étude et le site dans la composante aléatoire du modèle puisque plusieurs observations de la base de données sont rattachées à des études et des sites identiques. Basé sur l'approche dite "REML" (Residual Maximum Likelihood), le modèle était spécifiquement adapté aux jeux de données qui sont asymétriques, c'est à dire, lorsque la présence de données manquantes pour les variables à l'étude peut déséquilibrer certains niveaux de comparaisons (Bouwman et al., 2002). La composante fixe du modèle était le facteur explicatif testé. Chaque paramètre d'intérêt a été testé indépendamment afin d'identifier les modulateurs significatifs de l'effet des CC sur le rapport de rendement (RR), l'apport potentiel en azote (APA) et l'équivalent en azote minéral (EM) dans le maïs et les céréales de l'année suivante (analyse univariée). Dans le maïs, le nombre d'observations étant plus important, un modèle plus complexe a été élaboré pour le RR de façon à pouvoir mieux appréhender la variabilité des réponses observées dues aux multiples interactions avec les autres facteurs agronomiques et pédo-climatiques (approche multivariée). Seuls les facteurs les plus significatifs mais aussi les mieux renseignés ont été inclus dans le modèle REML multivarié de façon à fournir les estimés les plus fiables possibles au regard des données actuellement présentes dans la base de données.

Type de culture de couverture

- Légumineuses
- Mélanges avec légumineuses
- Graminées
- Dicotylédones non légumineuses

Système de culture de couverture

- En intercalaire
- En dérobée
- En pleine saison

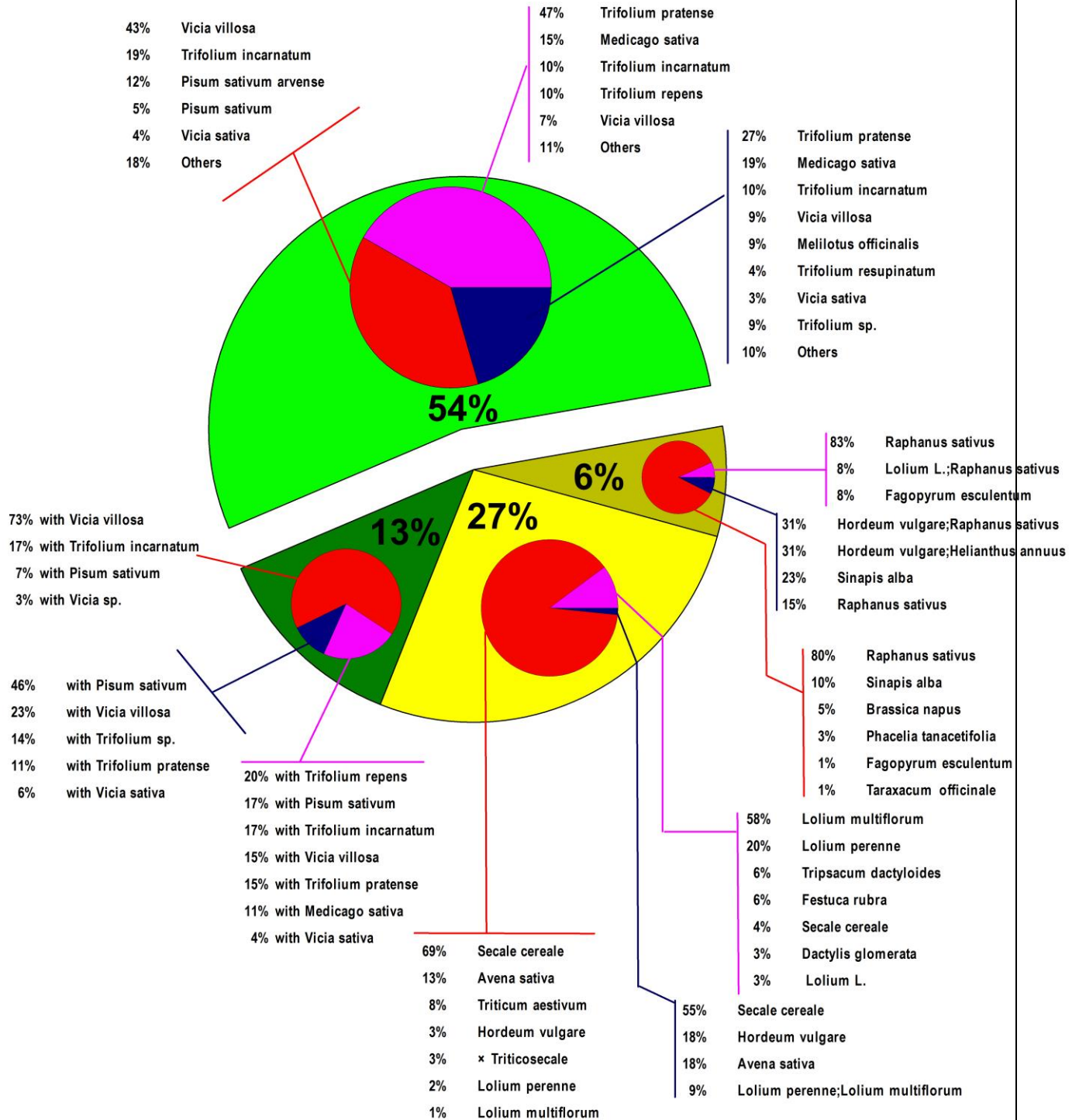


Figure 4. Diversité des espèces selon les types et les systèmes d'implantation des cultures de couverture

3. Résultats et discussion

3.1. Effet des cultures de couverture sur le rendement des grandes cultures (Objectif A)

L'effet des cultures de couverture (CC) sur le rendement des cultures subséquentes a été évalué en calculant un rapport de rendement (RR) tel que présenté ci-dessous.

$$\text{RR} = \frac{\text{rendement de la culture précédée d'une culture de couverture}}{\text{rendement de la culture sans culture de couverture}}$$

Un effet bénéfique des CC sur le rendement de la culture subséquente se traduit donc par un RR supérieur à 1. Inversement, un effet négatif se traduit par un RR inférieur à 1, tandis qu'un effet neutre se traduit par un RR égal à 1. Par exemple, un RR égal à 1.3 signifie que la culture de couverture aura permis d'obtenir une augmentation de 30 % des rendements de la culture subséquente. Un RR égal à 0.95 ou à 1.1 et non significativement différent de 1 se traduit par un effet neutre des CC sur le rendement de la culture subséquente. Finalement, un RR égal à 0.92 mais significativement différent de 1 se traduit par une diminution de 8 % des rendements de la culture attribuable à la présence de cultures de couverture.

Selon la figure 5, les bénéfices des CC sur le rendement des cultures suivantes sont positifs ou neutres pour 70 % des observations (n=2413, RR ≥ 1). L'effet des CC sur le rendement dépend de la culture considérée (Figure 5). L'effet global des CC (tous types de CC confondus) est significatif dans la production de maïs et de céréales avec des augmentations respectives de rendements de 16 % (RR de 1.16) et de 22 % (RR de 1.22) pour ces cultures. Au contraire, la présence de CC n'a pas d'effet significatif sur le rendement du soya. La suite de la méta-analyse a donc été effectuée séparément sur le maïs puis sur les céréales.

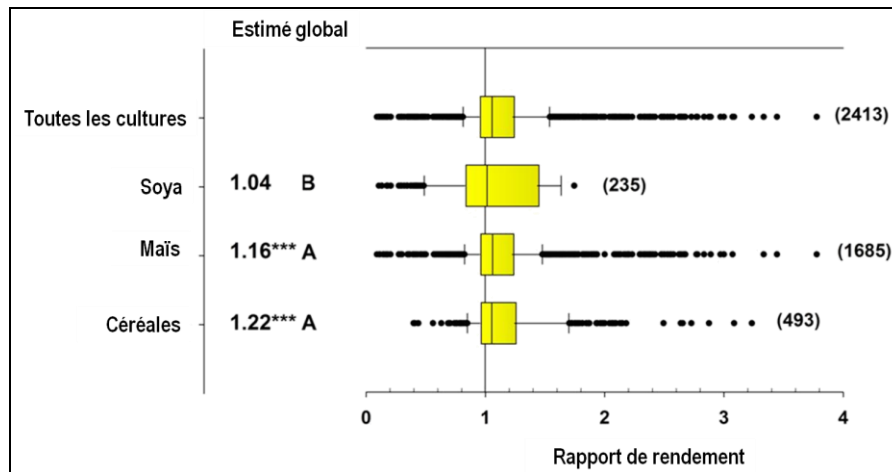


Figure 5. Effet global des cultures de couverture sur le rendement des grandes cultures

Entre parenthèse est reporté le nombre total d'observations disponibles. Les boîtes jaunes sont des diagrammes en boîte (boîtes à moustaches) permettant une représentation graphique des données statistiques afin de comparer le RR dans chacune des cultures. La ligne inférieure de la boîte la plus proche de zéro (axe X) indique le 25^{ème} percentile et la ligne supérieure de la boîte la plus éloignée de zéro indique le 75^{ème} percentile. Les barres d'erreur ("moustaches") inférieures et supérieures indiquent le 10^{ème} et le 90^{ème} percentile respectivement. La ligne solide à l'intérieur de la boîte indique la médiane et les points ronds noirs représentent les valeurs extrêmes.

*** significatif à 0,001

Effet des cultures de couverture sur le rendement du maïs

Afin de préciser l'effet des CC sur le rendement des cultures, nous avons évalué différents facteurs.

1) Tout d'abord, l'influence des types de CC (légumineuses, graminées et autres non-légumineuses (ex : crucifères)) et du système d'implantation des CC (en dérobée, intercalaire, pleine saison) ont été évalués indépendamment des autres facteurs avec une approche univariée qui inclue le maximum de données disponibles de la base de données. Une analyse de la variabilité de la réponse du rendement en fonction des espèces de CC et des systèmes d'implantation est donc présentée à la section suivante.

2) Par la suite, une approche multivariée a permis de réévaluer l'influence des types de CC en fonction des autres facteurs agronomiques et pédo-climatiques, appelés "modulateurs" sur le RR. Ces modulateurs sont les facteurs qui ont établi le meilleur modèle multivarié. Ils ont été sélectionnés parmi les facteurs agronomiques (travail du sol, précédent cultural, régie, etc.) et pédo-climatiques (texture du sol, matière organique du sol, pluviométrie, température) qui peuvent expliquer le comportement des CC et les augmentations de rendement observées. Leur influence respective et les possibles interactions sont aussi présentées dans la section suivante.

Il est à noter que les tableaux de résultats d'analyse de variance pour les deux approches sont disponibles en matériel supplémentaire aux annexes D et E. Dans les deux approches, le type de CC, le système d'implantation, les précipitations, la matière organique et la quantité d'azote minéral appliquée au maïs ont été les facteurs qui ont le plus influencé les bénéfices apportés aux rendements de la culture subséquente de maïs. Des interactions significatives ont été observées entre le type de CC et la fertilisation, entre le type de CC et les précipitations et entre la matière organique et la fertilisation. Les résultats provenant de l'approche univariée seront présentés en premier, suivis des résultats de l'approche multivariée

1) Évaluation de l'effet des cultures de couverture sur le rendement du maïs (approche univariée)

Le RR du maïs est significativement influencé par le type de CC (Tableau 1). Globalement, les CC légumineuses (seules ou mélangées à des CC non légumineuses) offrent de meilleures performances que les CC graminées ou non légumineuses avec 20 % d'augmentation de rendement du maïs. Les CC graminées ont un léger effet négatif avec une diminution de 5 % sur les rendements du maïs alors que les autres non-légumineuses (crucifères) n'ont pas d'effet.

Tableau 1. Effet des types de cultures de couverture sur le rapport de rendement (RR) du maïs (approche univariée)

Effet des types de cultures de couverture	N _{obs}	N _{études}	RR	(et)	Pr > t	
Légumineuses	948	37	1.20	(0.03)	A	***
Légumineuses et non-légumineuses (mélange)	240	9	1.20	(0.03)	A	***
Graminées	395	27	0.95	(0.02)	C	***
Autres non-légumineuses	104	11	1.08	(0.04)	B	ns

N_{obs} : nombre d'observations, ce nombre correspond aux moyennes des traitements rapportées dans les études sélectionnées;

N_{études} : nombre d'études

RR, rapport de rendement du maïs tel que défini

Les moyennes de RR partageant une même lettre majuscule ne sont pas significativement différentes par un test de lsd ($\alpha=0.05$)

(et), indique l'erreur type des estimés du modèle présentée entre parenthèses.

Pr > |t| indique si l'ensemble des observations à l'étude a un rapport de rendement significativement différent de 1, avec:

- ***, hautement significativement différent de 1 ($P<0.001$)

- ns, non significativement différent de 1 - pas d'effet ($P>0.1$)

Afin de compléter cette analyse, il est intéressant de voir, pour chacun des types de CC, l'influence du mode d'implantation (Tableau 2). Pour les légumineuses, les CC implantées en dérobée entraînent une augmentation de rendement de 27 % alors que l'effet des CC intercalaires se traduit par une augmentation de 17 % (Tableau 2). Cette différence de 8 % entre les types d'implantation ne s'avère toutefois pas significative. Pour comprendre ces résultats, il est possible de pousser plus loin l'analyse, en observant les résultats des études regroupées par espèce de CC. Si on considère les espèces qui ont fait l'objet de plusieurs études et qui peuvent être utilisées sous les conditions du Québec, on s'aperçoit que la vesce velue (*Vicia villosa*) entraîne des rapports de rendements élevés, et ce, qu'elle soit utilisée en dérobée ou en intercalaire. Par contre, il est possible qu'une espèce utilisée en intercalaire, comme le trèfle rouge (*Trifolium repens*), se traduira aussi par une augmentation de rendement du maïs élevé (15 %) similaire à une espèce, comme le pois fourrager (*Pisum sativum*), utilisée en dérobée (16 % d'augmentation de rendement).

Pour les mélanges de légumineuses et de non-légumineuses, seules les CC implantées en dérobée ont eu un effet significatif, avec une augmentation de rendement de 27 % (Tableau 2). Il est à noter que le nombre d'études portant sur les mélanges de CC sont beaucoup moins nombreuses. En dérobée, les mélanges de CC réfèrent essentiellement à l'utilisation combinée d'une légumineuse et d'une graminée (céréale), telle que les mélanges de vesce velue et de seigle (*Secale cereale*), de pois fourrager et de seigle ou encore de trèfle incarnat (*Trifolium incarnatum*) et d'avoine (*Avena sativa*). En intercalaire, les mélanges de CC réfèrent entre autres à l'utilisation combinée de trèfle et de ray-grass (*Lolium sp.*).

Pour les graminées, il semble que les CC implantées en dérobée n'ont pas d'effets sur le rendement subséquent du maïs alors que les CC implantées en intercalaire ont un effet négatif (Tableau 2). Toutefois, dans le cas des graminées, il est assez important de tenir compte de la date de destruction des CC (automne ou printemps) et des doses d'azote qui seront appliquées à la culture suivante de maïs. Cet aspect sera traité un peu plus loin. Les autres non légumineuses ont peu ou pas d'effet sur le rendement du maïs (Tableau 2). L'effet des crucifères implantées en dérobée comme le radis fourrager (*Raphanus sativus*), le colza (*Brassica napus*) ou la moutarde blanche (*Sinapis alba*) sera très dépendant de la durée de croissance et aussi de la fertilisation azotée présente lors de l'implantation de ces espèces.

En conclusion, les CC de type légumineuses (seules ou en mélange) ont donc un effet important sur le rendement du maïs qui peut probablement s'expliquer par l'apport d'azote à cette culture exigeante, comme on le verra dans les sections suivantes.

Tableau 2. Effet du type et des systèmes de cultures de couverture sur le rapport de rendement du maïs (approche univariée)

Type et système de CC	N _{obs}	N _{études}	RR (et)	Pr > t
Légumineuses	948	37	1.20 (0.03)	A ***
En dérobée	436	17	1.27 (0.06)	a ***
En intercalaire	430	21	1.17 (0.04)	a **
Mélanges avec légumineuses	240	9	1.20 (0.03)	A ***
En dérobée	206	7	1.27 (0.04)	a **
En intercalaire	34	3	1.03 (0.06)	b ns
Graminées	395	27	0.95 (0.02)	C ***
En dérobée	352	24	0.99 (0.02)	a ns
En intercalaire	43	6	0.90 (0.03)	b **
Autres non-légumineuses	104	11	1.08 (0.04)	B ns
En dérobée	97	8	1.02 (0.03)	a ns
En intercalaire	7	3	1.10 (0.05)	a t

RR (et) représente le rapport de rendement et son erreur type associée. Les symboles ***, **, *, ns indiquent respectivement si l'ensemble des observations à l'étude est hautement ($P < 0.001$), très significativement ($P < 0.01$), significativement ($P < 0.05$), et non significativement différent de 1 (Lsd, $\alpha = 0.05$). Le symbole ^t marque une tendance non significative ($P < 0.1$, $\alpha = 0.05$). Les estimés de RR partageant une même lettre majuscule ne sont pas significativement différents par un test de Lsd ($\alpha = 0.05$). Les lettres minuscules indiquent les différences entre les systèmes de CC pour chaque type de CC.

2) Évaluation de l'effet des cultures de couverture et des facteurs agronomiques et pédo-climatiques sur le rendement du maïs (approche multivariée)

L'analyse des données avec le modèle multivarié sur l'effet des CC permet de tenir compte des autres facteurs d'influence majeure sur le rendement, tels que la fertilisation du maïs, la matière organique du sol et les précipitations. Cette analyse est basée sur moins d'observations que l'analyse précédente, soit un sous-échantillon représentant 75% du total des observations disponibles. Certaines études qui ne rapportaient pas les valeurs de la fertilisation du maïs, de la matière organique du sol ou des précipitations par exemple, ont été exclues.

Comme l'approche univariée, le modèle multivarié confirme que les légumineuses performant mieux que les autres CC avec une augmentation significative des rendements de maïs de 21 % (Tableau 3). Il en est de même pour les mélanges légumineuses et non-légumineuses qui se traduisent par une augmentation de rendement de 16 %. Le modèle confirme aussi que les graminées seules ont un léger effet global négatif avec une diminution probable de 4 % sur les rendements du maïs. Les autres non légumineuses n'ont pas d'effet significatif sur les rendements du maïs. Cette dernière catégorie réfère essentiellement au radis fourrager.

Tableau 3. Effet des types de cultures de couverture sur le rapport de rendement (RR) du maïs (approche multivariée)

Effet des types de cultures de couverture	N _{obs}	N _{études}	RR	Erreur Type	Pr > t
Dans le maïs					
Légumineuses	688	28	1.21	(0.02)	A ***
Légumineuses et non-légumineuses	153	6	1.16	(0.03)	B ***
Graminées	334	21	0.96	(0.02)	C **
Autres non-légumineuses	75	8	1.07	(0.04)	D ns

RR (et) représente le rapport de rendement et son erreur type associée. Les symboles ***, **, *, ns indiquent respectivement si l'ensemble des observations à l'étude est hautement ($P < 0.001$), très significativement ($P < 0.01$), significativement ($P < 0.05$), et non significativement différent de 1 (Isd, $\alpha = 0.05$).

Modulation de l'effet des CC sur le RR par la fertilisation azotée du maïs

La fertilisation azotée du maïs influence très significativement le RR, et ce, selon les différents types de CC (Tableau 4). Les bénéfices des CC légumineuses sont maximaux en absence de fertilisation azotée complémentaire, se traduisant par une augmentation de rendement du maïs de 40 %. Au fur et à mesure que la fertilisation azotée du maïs augmente, on voit que l'effet des CC légumineuses sur le rendement diminue jusqu'à atteindre un plateau. Ainsi, avec une fertilisation azotée de 60 unités et moins, les CC légumineuses vont encore augmenter le rendement du maïs de 19 %, cet effet s'estompant pour atteindre des valeurs entre 6 et 12 % selon les doses apportées (entre 60 et 180 N), ces valeurs n'étant pas significativement différentes l'une de l'autre.

Pour expliquer ce phénomène, il faut considérer que les CC légumineuses peuvent avoir une action double sur les rendements d'une culture subséquente, soit par une contribution directe de leur azote, désignée sous le nom d'«effet azoté», soit par des effets indirects, désignés sous le nom d'«effets autres» (Liebman et al. 2012). La réponse caractéristique des effets azotés d'un engrais vert dans une culture donnée sera modulée par le niveau de fertilisation de cette culture. Dans les parcelles non fertilisées, l'apport net d'azote cause une augmentation significative des rendements, alors que cette réponse diminue avec des doses croissantes d'engrais azoté. Si une différence de rendement s'observe encore à la dose optimale d'azote appliquée à la culture, alors il y a présence d'effets autres. Dans ce cas, les rendements de la culture ne sont plus limités par l'azote dans l'une ou l'autre des parcelles, et la différence s'explique donc par d'autres facteurs, comme une meilleure disponibilité en eau, par exemple (Liebman et al. 2012).

Pour les mélanges (légumineuses/non-légumineuses), l'effet bénéfique des CC décroît aussi à mesure que la dose d'engrais azoté appliqué au maïs augmente et s'annule autour d'un apport d'azote compris entre 60 et 120 kg par hectare (Tableau 4). Les effets sont assez similaires qu'avec les CC légumineuses, soit une augmentation de 41% de rendement sans fertilisation, de 18 % avec une fertilisation de moins de 60 kg N/ha mais un effet neutre par après.

En revanche, l'effet négatif des CC graminées sur le rendement du maïs décroît à mesure que la dose d'engrais azoté appliquée au maïs augmente (Tableau 4). Ainsi, les diminutions de rendements (8 %) peuvent donc facilement être compensées par des apports d'azote compris entre 60 et 120 kg par hectare ou plus. Enfin, la modulation du RR par la fertilisation azotée minérale du maïs en présence de non-légumineuses autres que les graminées est nulle; la fertilisation azotée du maïs n'ayant pas d'effet (Tableau 4). On notera cependant que le nombre d'observations disponibles dans cette catégorie est plus faible que pour les autres CC. D'autres études seraient donc nécessaires pour préciser cet effet.

Modulation de l'effet des CC sur le RR par la matière organique du sol et la fertilisation azotée du maïs

La teneur en matière organique du sol va aussi moduler la réponse d'une culture à l'effet des cultures de couverture. Tel que présenté au Tableau 5, ce sont les sols qui ont une faible teneur en matière organique (< 2 %) qui répondront le plus à l'effet des CC. Sans apport de fertilisation azotée, les CC contribueront à une augmentation de rendement de 35% dans les sols qui ont moins de 2% de matière organique, cette augmentation passant de 22 % à 12 % pour des sols dont la teneur respective en matière organique est de 2 à 5 % et 5 à 10 % (Tableau 5). Lorsque la fertilisation azotée du maïs augmente à 60 et 120 kg N/ha, on voit que l'effet des CC s'estompe. Avec une fertilisation de 60 kg/ha, cet effet demeure significatif pour les sols ayant une teneur en matière organique de 5 % et moins (10 à 22% d'augmentation) alors que pour la fertilisation de 120 kg N/ha, seuls les sols ayant moins de 2 % de matière organique bénéficieront de l'effet des CC (9 % d'augmentation).

Tableau 4. Modulation du rapport de rendement (RR) du maïs par les doses de fertilisation azotée apportée au maïs selon les types de cultures de couverture (approche multivariée)

Type de CC	Fertilisation du maïs, kg N/ha	N _{obs}	N _{études}	RR (et)	Pr > t
Légumineuses		688	28	1.21 (0.02)	A ***
	0	248	19	1.40 (0.04)	a ***
	1-60	122	9	1.19 (0.03)	b ***
	61-120	114	15	1.06 (0.03)	c ns
	121-180	139	14	1.09 (0.03)	c *
	> 180	76	10	1.12 (0.03)	bc **
Mélanges avec légumineuses		168	7	1.16 (0.03)	B ***
	0	64	6	1.41 (0.07)	a ***
	1-60	24	3	1.18 (0.08)	b *
	61-120	24	3	0.98 (0.06)	c ns
	121-180	33	4	0.99 (0.06)	c ns
	> 180	23	2	1.04 (0.07)	bc ns
Graminées		332	21	0.96 (0.02)	C **
	0	87	11	0.92 (0.02)	c ***
	1-60	63	6	0.95 (0.03)	bc <0.1
	61-120	47	9	1.02 (0.03)	ab ns
	121-180	67	9	1.02 (0.03)	ab ns
	> 180	68	7	1.04 (0.03)	a ns
Autres non-légumineuses		75	8	1.07 (0.04)	D ns
	0	14	2	0.98 (0.03)	a ns
	1-60	40	4	1.04 (0.03)	a ns
	61-120	3	1	0.99 (0.06)	a ns
	121-180	12	2	0.96 (0.03)	a ns
	> 180	6	1	0.95 (0.04)	a ns

RR (et) représente le rapport de rendement et son erreur type associée. Les symboles ***, **, *, ns indiquent respectivement si l'ensemble des observations à l'étude est hautement ($P < 0.001$), très significativement ($P < 0.01$), significativement ($P < 0.05$), et non significativement différent de 1 (l_{sd}, $\alpha = 0.05$). Les estimés de RR partageant une même lettre majuscule ne sont pas significativement différents, toute dose de fertilisation azotée confondue. Les lettres minuscules indiquent les différences des RR entre les fertilisations azotées pour chaque type de CC

Tableau 5. Effet de la fertilisation azotée sur le rapport de rendement (RR) du maïs en fonction de la matière organique du sol (approche multivariée)

Matière organique du sol (0-10 cm)	Dose d'azote apportée au maïs								
	0 kg N par hectare			60 kg N par hectare			120 kg N par hectare		
	RR	(et)	Pr > t	RR	(et)	Pr > t	RR	(et)	Pr > t
< 2 %	1.35	(0.05)	A ***	1.22	(0.03)	A ***	1.09	0.03	A *
2 - 5 %	1.22	(0.04)	B ***	1.10	(0.02)	B ***	0.99	0.02	B ns
5 - 10 %	1.12	(0.05)	B t	1.01	(0.04)	B ns	0.92	0.07	B ns

RR (et) représente le rapport de rendement et son erreur type associée. Les symboles ***, **, *, ns indiquent respectivement si l'ensemble des observations à l'étude est hautement ($P < 0.001$), très significativement ($P < 0.01$), significativement ($P < 0.05$), et non significativement différent de 1 (l_{sd}, $\alpha = 0.05$). Les estimés de RR partageant une même lettre majuscule ne sont pas significativement différents.

Modulation de l'effet des CC sur le RR du maïs par les précipitations

L'effet des CC sur le RR est aussi modulé par les précipitations totales pondérées, calculées selon Tremblay et al. (2012), pour exprimer les précipitations abondantes et bien réparties (PABR) en mm sur la durée totale de l'étude. Dans les régions à faibles précipitations (500 mm), les CC légumineuses, seules ou en mélanges, permettent des augmentations de rendement du maïs (24 à 26 %) alors que les CC graminées ont un effet très négatif (13 % de diminution) sur le rendement (Tableau 6). Dans les régions enregistrant des précipitations plus élevées, l'effet négatif des CC graminées s'estompe, avec 6 % de diminution de rendement avec 1000 mm et aucun effet avec 1500 mm. L'effet positif des légumineuses, seules ou en mélange, demeure significatif pour toutes les régions. Bien que les effets des autres CC non-légumineuses résultent en des ratios positifs (6 à 8 %) pour toutes les régions, ces effets ne sont pas significatifs.

Tableau 6. Modulation du rapport de rendement (RR) du maïs par les précipitations totales selon les types de culture (approche multivariée)

Type de cultures de couverture	Précipitations Abondantes et Bien Réparties (PABR)								
	Faible, 500 mm			Moyen, 1000 mm			Élevé, 1500 mm		
	RR	(et)	Pr > t	RR	(et)	Pr > t	RR	(et)	Pr > t
Légumineuses	1.24	(0.04)	A ***	1.22	(0.02)	A ***	1.21	(0.02)	A ***
Légumineuses et non-légumineuses	1.26	(0.07)	A ***	1.18	(0.03)	A ***	1.11	(0.04)	B *
Graminées	0.87	(0.04)	B ***	0.94	(0.02)	C ***	1.02	(0.04)	B ns
Autres non-légumineuses	1.06	(0.11)	AB ns	1.07	(0.04)	B ns	1.08	(0.09)	AB ns

Le PABR est un indice des précipitations totales pondérées sur la durée de l'expérience (du semis de la culture de couverture à la récolte de la culture de maïs subséquente) calculé selon Tremblay et al. (2012).

RR (et) représente le rapport de rendement et son erreur type associée. Les symboles ***, **, *, ns indiquent respectivement si l'ensemble des observations à l'étude est hautement ($P < 0.001$), très significativement ($P < 0.01$), significativement ($P < 0.05$), et non significativement différent de 1 (Isd, $\alpha = 0.05$). Les estimés de RR partageant une même lettre majuscule ne sont pas significativement différents pour chaque groupe de précipitation.

Effet des cultures de couverture sur le rendement des céréales

Comme pour le maïs, plusieurs facteurs explicatifs ont été investigués pour vérifier les effets des CC sur le rendement des céréales subséquentes. Compte tenu de la présence de données manquantes selon les comparaisons de paramètres, il n'a pas été possible de faire une analyse multivariée. Seule l'approche univariée a été retenue. Le type de CC, le système d'implantation, les précipitations et la quantité d'azote accumulée dans la biomasse des CC ont été les facteurs influençant le plus les bénéfices des CC aux rendements des céréales (Annexe F).

Effet des types et des systèmes de cultures de couverture sur le rendement des céréales

Les céréales ont une réponse assez similaire au maïs, montrant des augmentations de rendement de 19 à 27 % suite à des CC légumineuses, seules ou en mélange (Tableau 7). Les CC graminées n'ont aucun effet alors que les autres CC non-légumineuses ont un effet positif sur le rendement des céréales avec une augmentation moyenne de 16 %.

Chez les céréales, le système de CC a une influence très significative. Les CC implantés en pleine saison et en intercalaire ont un effet très positif sur les rendements subséquents des céréales avec des augmentations respectives de 27 % et 23 % alors que les CC implantées en dérobée n'ont pas d'effets (Tableau 8). Il est à noter que pour les céréales, il fut possible d'intégrer les CC de pleine saison dans notre analyse car ces dernières avaient fait l'objet de plusieurs études, ce qui n'a pas été le cas dans le maïs, où très peu d'études ont pu être incluses et ne concernaient que le groupe des légumineuses.

Les CC légumineuses implantées en pleine saison étaient représentés par le pois fourrager, le mélilot (*Melilotus alba*), la luzerne (*Medicago sativa*), les trèfles (rouge et blanc) ainsi que les vesces. En intercalaire, ce sont surtout le mélilot, la luzerne et les trèfles seuls ou en mélange qui ont bien performé et ont permis des augmentations de rendement chez les céréales implantées l'année suivante. En dérobée, seul le pois

fouurrager s'est distingué avec une augmentation de 9 %. Pour les autres types de CC (mélanges, graminées et autres), le nombre d'études est moins élevé, il est plus difficile de tirer des conclusions.

Tableau 7. Effet des types de cultures de couverture sur le rapport de rendement (RR) des céréales

Effet des types de cultures de couverture	N _{obs}	N _{études}	RR (et)	Pr > t
Légumineuses	283	24	1.27 (0.05) A	***
Légumineuses et non-légumineuses	36	6	1.19 (0.06) AB	**
Graminées	42	12	1.02 (0.05) C	ns
Autres non-légumineuses	54	10	1.16 (0.05) B	*

Tableau 8. Effet des systèmes de cultures de couverture sur le rapport de rendement (RR) des céréales

Effet des types de cultures de couverture	N _{obs}	N _{études}	RR (et)	Pr > t
Pleine saison	186	15	1.27 (0.05) A	***
Dérobée	114	8	1.02 (0.05) B	ns
Intercalaire	115	12	1.23 (0.05) A	***

RR (et) représente le rapport de rendement et son erreur type associée. Les symboles ***, **, *, ns indiquent respectivement si l'ensemble des observations à l'étude est hautement ($P < 0.001$), très significativement ($P < 0.01$), significativement ($P < 0.05$), et non significativement différent de 1 (Isd, $\alpha = 0.05$). Les estimés de RR partageant une même lettre majuscule ne sont pas significativement différents.

Effet des précipitations sur le rendement des céréales

Chez les céréales, l'effet des précipitations enregistrées durant la période qui s'étend du semis de la CC jusqu'à la récolte des céréales subséquentes revêt une grande importance quant aux effets sur les rendements. Le tableau 9 montre une augmentation des rendements des céréales (de 8 % à 38 %) au fur et à mesure que les précipitations augmentent pour les régions avec un indice PABR de plus de 800 mm.

Tableau 9. Effet des précipitations totales abondantes et bien réparties (PABR) sur le rapport de rendement (RR) des céréales

Précipitations Abondantes et Bien Réparties (PABR)	N _{obs}	N _{études}	RR (et)	Pr > t
< 800 mm	151	11	1.08 (0.06) C	ns
800-1000 mm	83	11	1.17 (0.06) B	*
1000-1500 mm	125	12	1.25 (0.06) AB	***
>1500 mm	32	7	1.38 (0.09) A	***

Le PABR est un indice des précipitations totales pondérées sur la durée de l'expérience (du semis de la culture de couverture à la récolte de la culture de céréale subséquente) calculé selon Tremblay et al. (2012).

RR (et) représente le rapport de rendement et son erreur type associée. Les symboles ***, **, *, ns indiquent respectivement si l'ensemble des observations à l'étude est hautement ($P < 0.001$), très significativement ($P < 0.01$), significativement ($P < 0.05$), et non significativement différent de 1 (Isd, $\alpha = 0.05$). Les estimés de RR partageant une même lettre majuscule ne sont pas significativement différents.

5.2. Effet des cultures de couverture sur la dynamique de l'azote (Objectif B)

A- Méthodes d'estimation de la contribution azotée des cultures de couverture

Il existe plusieurs méthodes pour calculer la contribution azotée d'une CC. Dans le cadre de ce rapport et en fonction des données qui étaient disponibles dans cette base de données, nous avons retenu quatre méthodes de calcul que nous désignerons de la façon suivante, soit : (1) la quantité d'azote accumulée dans la biomasse aérienne de la CC, (2) l'équivalent en azote minéral, (3) le crédit d'azote minéral, (4) le crédit apparent d'azote. Alors que la première méthode ne représente que l'apport potentiel en azote des CC, les trois autres méthodes estiment la contribution azotée des CC au rendement de la culture subséquente.

(1) Quantité d'azote accumulée dans la biomasse aérienne de la CC

Une des premières mesures qui peut être prise est le rendement en matière sèche de la biomasse aérienne de la CC et sa concentration en azote, juste avant son arrêt de croissance, qui peut être provoqué soit par un gel mortel, une application d'herbicide ou une action mécanique (labour, roulage, etc). En réalisant cette mesure, on obtient la quantité d'azote qui a été accumulée dans la biomasse aérienne de la CC, juste avant sa destruction et sa minéralisation ultérieure. La quantité d'azote accumulée qu'on peut appeler aussi apport potentiel d'azote (APA) sera donc calculée ainsi :

$$\text{APA (kg N/ha)} = \text{Rendement en matière sèche de la CC (kg/ha)} \times \text{Concentration en azote de la CC (\%)}$$

Il a été démontré qu'une part significative d'azote peut se retrouver dans les racines (Reeves 1994). Par contre, comme la contribution racinaire est difficile à mesurer, plusieurs auteurs mesurent la productivité de la CC, que ce soit en termes de biomasse ou d'accumulation d'azote, en n'échantillonnant que sa biomasse aérienne (Gentry et al. 2013). Dans le cadre de notre méta-analyse, nous avons considéré la quantité d'azote accumulée seulement dans la biomasse aérienne, compte tenu du nombre très faible d'études mentionnant la contribution racinaire. Il est important de spécifier que cet apport d'azote est potentiel, en considérant que cet azote devra subir plusieurs processus avant d'être disponible pour la culture subséquente.

Dès le moment de la destruction de la CC, la décomposition s'amorce et les nutriments ayant été prélevés lors de la croissance retournent éventuellement au sol. En se décomposant, l'azote organique de la biomasse de la CC subira différentes transformations. Alors que certaines fractions plus récalcitrantes de la biomasse se retrouveront piégées au sein de particules minérales, à l'abri de la décomposition, d'autres fractions plus labiles se décomposeront plus rapidement, consommées par les organismes décomposeurs (Golchin et al. 1994). Tonitto et al. (2006) ont observé que plus la quantité d'azote accumulée dans la biomasse d'une CC est importante à l'enfouissement, plus son impact sur les rendements de la culture subséquente est marqué. La relation entre la quantité d'azote enfouie et la contribution azotée d'une CC à la culture subséquente n'est cependant pas simple à établir, puisque la décomposition et la libération des nutriments, en plus de dépendre de facteurs intrinsèques tels que la qualité de la biomasse de la CC (rapport C/N, teneur en lignine, etc) sont aussi influencées par des facteurs environnementaux tels que la température et les précipitations (Ruffo et Bollero, 2003). Ainsi, la dynamique de décomposition d'une CC résultera soit en une minéralisation nette, soit en une immobilisation nette. Dans le cas d'une CC de légumineuses, l'objectif principal est de rendre disponible l'azote qui a été accumulé dans ses tissus par une minéralisation nette de sa biomasse.

(2) L'équivalent en azote minéral (ENM)

L'équivalent en azote minéral (ENM) d'une CC est calculé comme la quantité de fertilisant azoté minéral qui devrait être appliqué à la culture subséquente pour atteindre un rendement équivalent à celui obtenu suite à la CC sans avoir fertilisé la culture (Shrader et al., 1966; Garand et al., 2001; Thilakarathna et al., 2015). Tel que démontré à la Figure 6, le rendement de la culture de blé atteint après la CC (3332 kg/ha) sans fertilisation est reporté sur la courbe de régression du rendement du blé obtenue avec différents niveaux d'azote minéral. Dans cette expérience, l'équivalent en azote minéral de la CC de trèfles rouge et blanc serait de 45 kg N/ha. Cette méthode suppose que l'effet de la CC est seulement dû à un effet azoté et ne fait pas de distinction entre un effet azoté et un effet non-azoté (par exemple d'amélioration de la structure du sol).

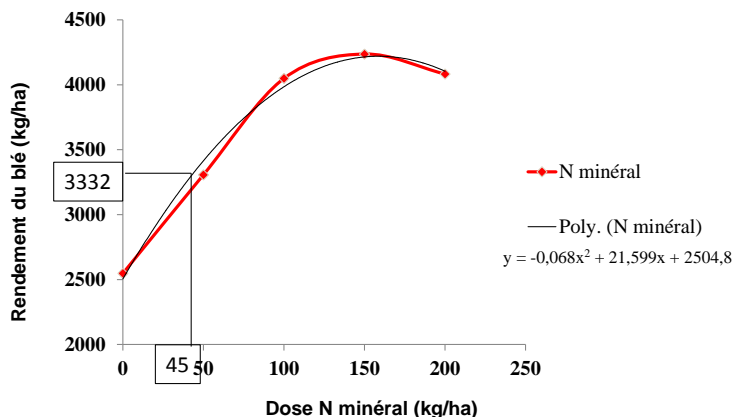


Figure 6. Calcul de l'équivalent en azote minéral d'une CC de trèfles sur une culture subséquente de blé (Verville et Vanasse, non publié)

(3) Le crédit d'azote minéral (CNM)

Le crédit d'azote minéral est calculé en estimant la quantité d'azote correspondant au rendement maximal de la culture avec CC et sans CC (Smith et al., 1987). Cette approche peut être utilisée uniquement si la relation entre le rendement de la culture et la fertilisation azotée atteint un maximum (Garand et al., 2001). Dans l'exemple présenté à la figure 7, la quantité d'azote pour obtenir un rendement maximal de maïs suite à une CC de pois fourrager était de 125 kg N/ha alors que le rendement maximal de maïs sans CC a été atteint avec 240 kg N/ha. Le crédit d'azote minéral est donc de 115 kg N/ha (240 kg N/ha – 125 kg N/ha). Cette méthode procure un estimé plus précis lorsque des effets non-azotés sont observés (Lory et al. 1995), mais il faut que le rendement maximum soit atteint avec les niveaux d'azote testés.

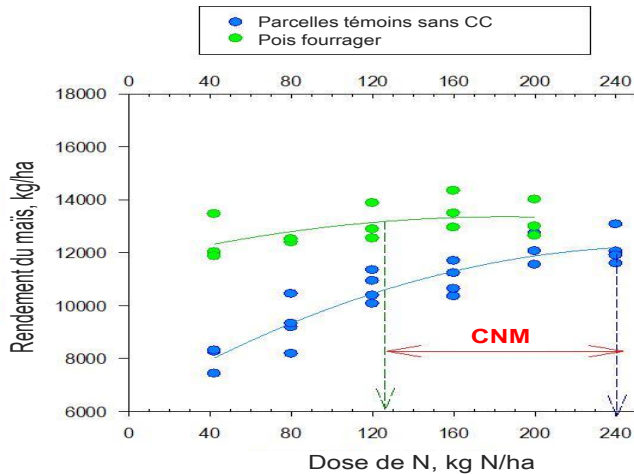


Figure 7. Crédit d'azote minéral (CNM) d'une CC de pois fourrager sur une culture subséquente de maïs (Bérubé, 2016)

(4) Le crédit apparent d'azote (CAN)

Cette méthode considère l'accumulation d'azote dans la partie aérienne de la culture subséquente à la CC comme un estimé de la minéralisation nette du sol (Gentry et al., 2013). Le crédit apparent d'azote (CAN) représente donc la différence entre la quantité d'azote accumulée dans la biomasse aérienne (grains et paille) de la culture subséquente à la CC avec la quantité d'azote accumulée par cette même culture maïs sans CC.

B- Quantité d'azote accumulée dans la biomasse aérienne des CC (ou apport potentiel d'azote)

Dans un premier temps, nous avons calculé la quantité d'azote accumulée dans la biomasse aérienne des CC en combinant toutes les études, c'est-à-dire en considérant les systèmes de production du maïs et des céréales. En considérant l'ensemble des études, les mélanges légumineuses/non-légumineuses et les légumineuses seules se distinguent clairement, en accumulant respectivement 91 kg N/ha et 74 kg N/ha, alors que les CC graminées et crucifères (autres non-légumineuses) accumulent une moyenne de 30 unités d'azote (Tableau 10).

L'utilisation des légumineuses est intéressante pour leur aptitude à effectuer la fixation de l'azote atmosphérique et participer à la nutrition des cultures subséquentes. Les espèces non fixatrices présentent quant à elles les avantages des CC sans l'apport net d'azote, mais peuvent en contrepartie s'avérer plus efficaces pour réduire les pertes de nutriments dans l'environnement ou améliorer la structure du sol (Breland 1995; Dapaah et Vyn 1998; Tonitto et al. 2006). Dans le cas des mélanges de CC, il est attendu que les propriétés combinées des espèces choisies soient additives, et qu'il y ait une production accrue de biomasse (Miguez et Bollero 2005; Cherr et al. 2006). Par exemple, un mélange graminée/légumineuse aurait des qualités telles que la capacité de réduire les pertes environnementales, en diminuant les niveaux d'azote minéral résiduel après la récolte, tout en apportant une certaine quantité d'azote à la culture subséquente (Miguez et Bollero 2005).

Tableau 10. Quantité d'azote accumulée dans la biomasse aérienne des CC (APA) selon les types de cultures de couverture

Types de cultures de couverture	APA, kg N/ha		
	Estimé	(et)	
Légumineuses	74	(8)	B
Mélanges avec légumineuses	91	(11)	A
Graminées	29	(3)	C
Autres non-légumineuses	32	(4)	C

(et) représente l'erreur type associée à l'estimé de l'apport potentiel d'azote (APA).

Le système d'implantation de la CC a aussi un effet. Selon l'ensemble des études, le fait d'implanter la CC seule durant toute une saison ou de la cultiver en intercalaire avec une culture principale permet à la CC d'accumuler davantage d'azote (81-97 kg N/ha) que lorsque les CC sont implantées en dérobée après la culture principale (Tableau 11). Cependant, ce résultat doit être grandement modulé, puisqu'il représente la moyenne des espèces (légumineuses, graminées, etc) par système et considère l'ensemble des études qui ont été réalisées tant dans le maïs que dans les céréales.

Tableau 11. Quantité d'azote accumulée dans la biomasse aérienne des CC (APA) selon les systèmes de cultures de couverture

Systèmes de cultures de couverture	APA, kg N/ha		
	Estimé	(et)	
Pleine saison	97	(16)	A
Intercalaire	81	(11)	A
En dérobée	39	(5)	B

(et) représente l'erreur type associée à l'estimé de l'apport potentiel d'azote (APA).

Afin de vérifier plus précisément les quantités d'azote accumulées par les CC, une analyse des données a été réalisée de façon indépendante pour les études concernant les systèmes dont la culture subséquente est le maïs ou les céréales, et en tenant compte des différents systèmes d'implantation pour chaque type de CC.

Quantité d'azote accumulée par les CC précédant la culture du maïs

Pour la culture du maïs, les mélanges légumineuses/non-légumineuses et les légumineuses seules se distinguent encore clairement des CC graminées et autres non-légumineuses, en accumulant respectivement 115 kg N/ha et 95 kg N/ha (Tableau 12). Lorsqu'on considère les différents systèmes d'implantation par type de CC, il est possible de préciser davantage les quantités d'azote accumulées selon les différents scénarios (Tableau 13). Toutefois, dans certains cas, le nombre d'études considérées est faible, il faut donc être prudent, quant à l'interprétation de ces données.

Les légumineuses, implantées en dérobée et regroupant des espèces telles que les vesces, pois fourrager et certains trèfles, ont permis d'atteindre un cumul moyen d'azote de 126 kg N/ha (Tableau 13), significativement plus élevé que la quantité d'azote accumulée par les légumineuses implantées en intercalaire (56 kg N/ha). Bien que les espèces utilisées en intercalaire soient sensiblement les mêmes (trèfles, vesces ou luzerne) qu'en dérobée, il est possible que la compétition faite par la culture (soit une céréale, du maïs ou du soya) à la CC ait été suffisante pour réduire la croissance et la production de biomasse de la CC, influençant ainsi le cumul d'azote en fin de saison. Les études effectuées dans le maïs proviennent surtout de l'Ontario et des états américains, permettant une saison de croissance assez longue. Pour les espèces implantées en dérobée, la fenêtre d'implantation et le nombre de jours de croissance disponible est important à tenir compte, comme on le verra plus loin. Pour les légumineuses de pleine saison, le nombre d'études n'était pas suffisant pour que l'on puisse statuer.

Pour les mélanges légumineuses/non légumineuses, la grande partie des études a été réalisée avec des mélanges implantés en dérobée, pour une quantité moyenne d'azote accumulée de 142 kg N/ha (Tableau 13). Les mélanges vesce/seigle et pois fourrager/seigle étaient les groupes les plus représentés. Bien que basé sur peu d'études, les mélanges en intercalaire ont moins bien performé.

Pour les CC graminées, il n'y a pas de différence entre le système d'implantation (dérobée ou intercalaire), la quantité d'azote accumulée moyenne étant d'environ 45 kg N/ha. Chez les autres CC non-légumineuses telles que les crucifères, les quantités d'azote accumulées sont moins élevées. Pour ce groupe de CC, la fertilisation résiduelle va grandement influencer la croissance et la production de biomasse. Sans apport de fertilisants, la quantité accumulée d'azote peut être relativement faible. Par contre, ce groupe de CC aura d'autres fonctions améliorantes en lien avec la qualité des sols.

Tableau 12. Quantité d'azote accumulée dans la biomasse aérienne des CC (APA) selon les types de cultures de couverture précédant la culture du maïs

Types de cultures de couverture	APA, kg N/ha			
	N _{obs}	N _{études}	Estimé (et)	
Légumineuses	750	24	95	(8) B ***
Mélanges avec légumineuses	194	29	115	(8) A ***
Graminées	303	17	22	(8) C *
Autres non-légumineuses	26	4	33	(11) C **

(et) représente l'erreur type associée à l'estimé de l'apport potentiel d'azote (APA).

Tableau 13. Quantité d'azote accumulée dans la biomasse aérienne des CC (APA) selon les types et systèmes de cultures de couverture précédant la culture du maïs

	APA	(et)	
Légumineuses			
– Implantées en dérobée	126	(7)	A
– Implantées en intercalaire	56	(7)	B
Légumineuses et non légumineuses			
– Implantées en dérobée	142	(12)	A
– Implantées en intercalaire	69	(17)	B
Graminées			
– Implantées en dérobée	43	(5)	A
– Implantées en intercalaire	46	(7)	A
Autres non légumineuses			
– Implantées en dérobée	22	(11)	A
– Implantées en intercalaire	6	(7)	A

Les moyennes d'apport potentiel d'azote (APA) partageant une lettre majuscule identique ne sont pas significativement différentes, au sein de chaque type de culture de couverture considérée (test du lsd, $\alpha=0.05$). (et), indique l'erreur type des estimés du modèle présentée entre parenthèses. Il est à noter que le nombre d'observations de cette analyse est différent du nombre d'observations considérées pour l'analyse complète par type de CC.

Quantité d'azote accumulée par les CC précédant la culture des céréales

Dans les études reliées aux systèmes céréaliers (CC précédant une céréale à paille), les légumineuses, seules ou en mélange, permettent un apport potentiel d'azote plus élevé (APA moyen de 82 kg N/ha) que les crucifères (autres non-légumineuses) et les graminées (Tableau 14).

Lorsqu'on considère les différents systèmes d'implantation par type de CC, on s'aperçoit qu'il y a des différences par rapport au système étudié dans le maïs, surtout avec les CC légumineuses (Tableau 15). Les légumineuses, seules ou en mélange, implantées en pleine saison, ont permis des accumulations d'azote élevées (104 à 130 kg N/ha). Ces systèmes incluaient principalement des CC de trèfles, de vesces ou de pois fourrager et étaient bien représentés dans les études scandinaves. Les légumineuses (telles que les trèfles) implantées en intercalaire ont apporté près de 70 N et ont mieux performé que les légumineuses implantées en dérobée, qui ont eu moins de temps pour s'établir dans les conditions plus nordiques.

Pour les CC graminées, il n'y a pas de différence entre le système d'implantation (pleine saison, dérobée ou intercalaire), la quantité d'azote accumulée moyenne étant d'environ 34 kg N/ha. Pour les CC crucifères (autres non-légumineuses), il semble que le système de pleine saison ait permis un cumul d'azote plus élevé, supérieur à l'implantation en dérobée, le mode d'implantation en intercalaire étant intermédiaire.

Tableau 14. Quantité d'azote accumulée dans la biomasse aérienne des CC (APA) selon les types de cultures de couverture précédant la culture des céréales

Types de cultures de couverture	APA, kg N/ha		
	N _{obs}	N _{études}	Estimé (et)
Légumineuses	167	17	77 (14) A ***
Mélanges avec légumineuses	17	5	87 (18) A ***
Graminées	42	12	32 (6) C ***
Autres non-légumineuses	50	9	45 (9) B ***

Tableau 15. Quantité d'azote accumulée dans la biomasse aérienne des CC (APA) selon les types et systèmes de cultures de couverture précédant la culture des céréales

Types et systèmes de cultures de couverture	APA (et)	Pr > t
Légumineuses		
Pleine saison	104 (24)	A
En dérobée	27 (7)	C
Intercalaire	69 (16)	B
Mélanges avec légumineuses		
Pleine saison	130 (29)	A
Intercalaire	43 (14)	B
Graminées		
Pleine saison	48 (23)	A
En dérobée	27 (9)	A
Intercalaire	28 (10)	A
Autres non-légumineuses		
Pleine saison	118 (23)	A
En dérobée	28 (4)	B
Intercalaire	69 (24)	AB

Les moyennes d'apport potentiel d'azote (APA) partageant une lettre majuscule identique ne sont pas significativement différentes au sein de chaque type de culture de couverture considérée (test du lsd, $\alpha=0.05$). (et), indique l'erreur type des estimés du modèle présentée entre parenthèses. Il est à noter que le nombre d'observations de cette analyse est différent du nombre d'observations considérées pour l'analyse complète par type de CC.

Facteurs modulant les quantités d'azote accumulées par les CC

Parmi les facteurs (autres que les types et systèmes de CC) qui ont influencé significativement les quantités d'azote accumulées, on retrouve la durée de croissance des CC, la texture du sol ainsi que les précipitations mesurées durant l'année d'établissement de la CC jusqu'à sa terminaison. La durée de croissance d'une CC a beaucoup d'influence sur les apports potentiels en azote (Tableau 16). Lorsque la durée de croissance est moins de 2 mois, le cumul d'azote par la CC atteint 32 kg N/ha alors qu'il augmentera graduellement jusqu'à atteindre 94 kg N/ha après 10 mois. Il est à noter que ces valeurs peuvent varier considérablement selon les espèces de CC et systèmes et qu'il s'agit là de valeurs moyennes. Plus un engrais vert est semé tôt et plus il sera productif en termes de biomasse, avec des différences de rendement qui peuvent passer du simple au double pour des semis faits à un mois d'intervalle (Richards et al. 1996). Ce constat s'applique particulièrement aux CC en dérobée. Afin de maximiser les bénéfices qui découlent de l'usage d'une CC, il faut prendre en compte la fenêtre accordée à sa croissance lors du choix de l'espèce. Selon la rotation choisie par le producteur, la fenêtre disponible pour faire croître la CC peut donc influencer grandement sa productivité.

Tableau 16. Quantité d'azote accumulée dans la biomasse aérienne des CC (APA) selon la durée de croissance de la culture de couverture

Durée de croissance de la CC	Apport d'azote potentiel kg N/ha		
	Estimé	Erreur	Type
> 10 mois	94	11	A
6 - 10 mois	71	8	B
4 - 6 mois	58	7	C
2 - 4 mois	46	6	D
< 2 mois	32	6	E

Afin de préciser davantage l'effet de la durée de croissance en fonction des types et systèmes de CC, nous avons fait une analyse en regroupant les données. Toutefois, ce ne sont pas tous les types de CC qui sont représentés pour chaque système et durée de croissance (Figure 8).

Bien que les APA des légumineuses en dérobée et en intercalaire pourraient être plus élevées que ces estimés moyens si les conditions automnales (température et précipitations) permettent une bonne croissance des CC, les résultats montrent que l'APA des légumineuses peut tripler lorsque la durée de croissance double (de 4 à 6-10 mois, Figure 8).

En dérobée, les légumineuses vont accumuler environ 50 kg N/ha pour une durée de croissance de moins de 2 mois et de 2 à 4 mois alors que le cumul d'azote pourra augmenter jusqu'à 75 kg N/ha pour une durée de 4 à 6 mois et à environ 140 kg N/ha pour une durée de 6 à 10 mois (Figure 8). Pour les durées de croissance de 4-6 mois et de 6-10 mois, les mélanges légumineuses/non légumineuses vont performer davantage avec des cumuls respectifs de 140 et 150 kg N/ha. Pour les périodes plus longues (de plus de 6 mois), il s'agit souvent de légumineuses pérennes qui seront détruites au printemps, avant la culture subséquente. Pour les graminées et les crucifères, le cumul d'azote demeure sensiblement le même, peu importe les durées de croissance. Il en est de même pour les autres systèmes d'implantation (intercalaire et pleine saison) où les cumuls d'azote de ces espèces n'étaient pas significativement différents entre les périodes de croissance.

En intercalaire, la durée de croissance des CC de 4 à 6 mois se traduit par une accumulation moyenne d'azote d'environ 50 kg N/ha (toutes espèces confondues), cette valeur pouvant augmenter jusqu'à 75-100 kg N/ha pour les légumineuses et les mélanges, et ce, pour des périodes plus longues (6 mois et plus).

En pleine saison, il existe une grande variabilité selon les espèces de légumineuses utilisées seules ou en mélange, les accumulations moyennes varient de 60 à 110 kg N/ha pour la durée de 2 à 4 mois et se stabilisant à une valeur moyenne d'environ 125 et 150 kg N/ha pour les périodes respectives de 4 à 6 mois et 6 à 10 mois. Après plus de 10 mois, il semble que l'apport potentiel d'azote des légumineuses et des mélanges diminue (< 100 kg N/ha).

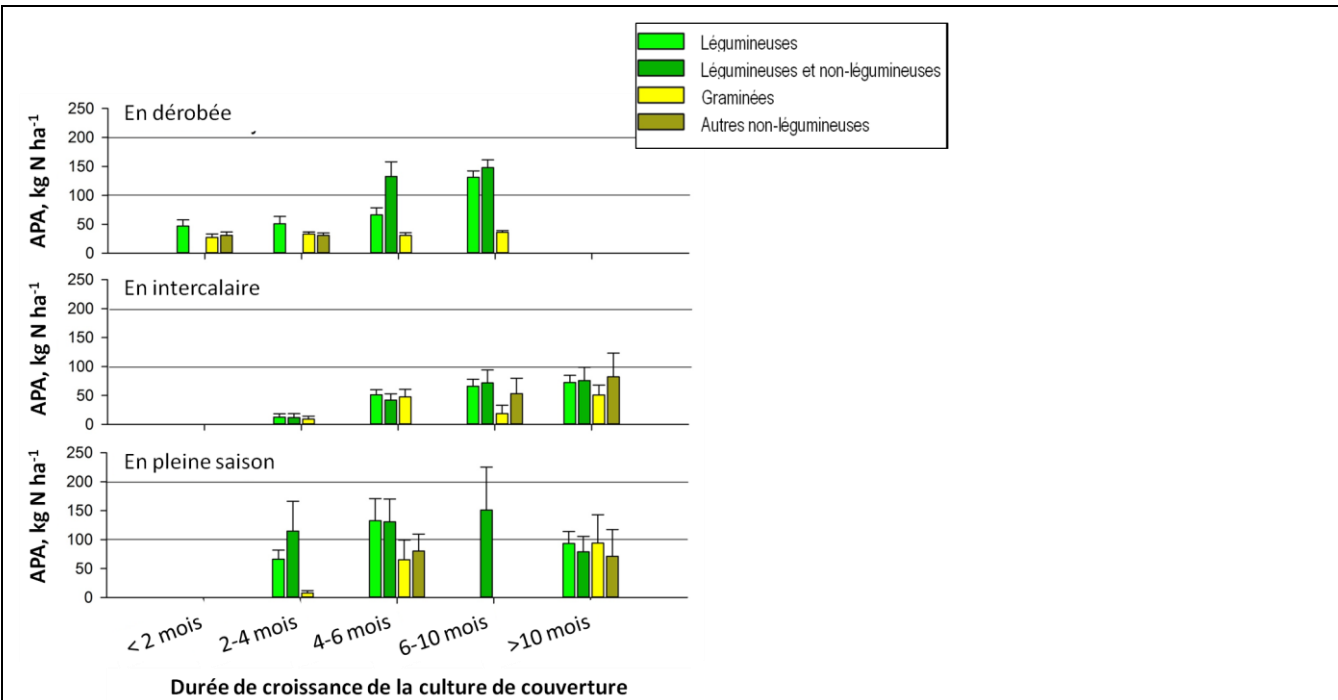


Figure 8. Apport potentiel d'azote (APA) de la biomasse aérienne des CC selon la durée de croissance, le type et le système de la culture de couverture (*Les barres verticales sont les erreurs-types*)

Comme autre facteur d'influence, on retrouve la texture de sol. Lorsqu'on considère la moyenne des APA de toutes les espèces de CC, il n'y a pas de différence entre les textures de sol (Tableau 17). Par contre, il y a une interaction très significative entre ces deux facteurs. En texture grossière, les légumineuses seules ou en mélange, performant mieux (87 à 115 kg N/ha) que les graminées et crucifères (autre non-légumineuses). Ces deux types de CC nécessitent souvent des apports de fertilisants ou des sols permettant une certaine minéralisation de l'azote pour bien performer. En texture moyenne, cette différence entre les légumineuses (seules ou en mélange) et les graminées et crucifères persiste alors qu'elle s'atténue de façon importante dans les sols à texture fine, qui sont naturellement plus fertiles que les sols à texture grossière.

En plus de la fertilité liée aux textures de sol, il faut aussi considérer comment l'apport en eau peut faire varier la performance des CC. Pour les sols à texture moyenne et fine, on s'aperçoit que les biomasses aériennes et l'APA des CC vont augmenter significativement dans les zones qui reçoivent des précipitations (PABR) de plus de 400 mm reçues durant l'année de croissance des CC (Tableau 18). Pour un sol à texture moyenne, en comparaison avec une précipitation de moins de 400 mm, le fait de produire des CC dans des zones de 400 à 800 mm permettra d'obtenir 44 % plus de biomasse aérienne et 48 % plus d'azote alors qu'avec plus de 800 mm, les quantités de biomasse aérienne et les APA sont presque doublés. Cette situation est encore plus accentuée avec les sols à texture fine, où les APA vont plus que doubler avec des précipitations de 400 à 800 mm et quadruplé avec des précipitations de plus de 800 mm (Tableau 18).

Tableau 17. Apport potentiel d'azote (APA) de la biomasse aérienne des CC selon la texture du sol et le type de cultures de couverture

Texture du sol	Type de culture de couverture	N _{obs}	N _{études}	APA (et)	
Grossière		582	28	72 (11)	A
	Légumineuses et non légumineuses	78	6	115 (13)	a
	Légumineuses	293	20	87 (12)	b
	Autres non légumineuses	61	10	33 (13)	c
	Graminées	150	14	26 (12)	c
Moyenne		1098	47	80 (9)	A
	Légumineuses et non légumineuses	166	12	118 (8)	a
	Légumineuses	532	37	102 (8)	b
	Autres non légumineuses	69	12	53 (11)	c
	Graminées	331	33	24 (8)	d
Fine		490	28	79 (12)	A
	Légumineuses	324	22	80 (17)	a
	Légumineuses et non légumineuses	46	4	65 (20)	ab
	Graminées	92	11	43 (18)	b
	Autres non légumineuses	28	6	42 (18)	b

APA : apport potentiel en azote, (et) : erreur-type

Les estimés de APA partageant une même lettre majuscule ne sont pas significativement différents par un test de lsd ($\alpha=0.05$). Les lettres minuscules indiquent les différences entre les types de CC pour chaque texture de sol par un test de lsd ($\alpha=0.05$).

Tableau 18. Effet des précipitations abondantes et bien réparties à l'année 1 sur l'apport potentiel d'azote (APA) de la biomasse aérienne et la biomasse aérienne des cultures de couverture en fonction de la texture du sol

Texture du sol	PABR* à l'année 1, mm	APA (et)		Biomasse aérienne (et)	
		kg N/ha		Kg/ha	
Grossière	< 400	54	(10) A	1818	(442) A
	400 - 800	57	(10) A	2059	(519) A
	> 800	64	(13) A	1956	(452) A
Moyenne	< 400	45	(8) C	1526	(295) B
	400 - 800	67	(10) B	2191	(402) A
	> 800	84	(14) A	2477	(475) A
Fine	< 400	33	(8) C	2318	(749) B
	400 - 800	77	(20) B	3831	(749) A
	> 800	139	(43) A	4311	(796) A

Le PABR* est un indice des précipitations totales pondérées sur la durée de croissance de la culture de couverture (du semis de la culture de couverture à la terminaison de la culture de couverture) calculé selon Tremblay et al. (2012).

Les lettres majuscules indiquent les différences entre les PABR pour chaque texture de sol par un test de lsd ($\alpha=0.05$). (et), indique l'erreur type des estimés du modèle présentée entre parenthèses.

C- Contribution en azote des cultures de couverture pour le maïs

L'azote apporté au système par une CC sera non seulement prélevé par la culture subséquente, mais il pourra également se retrouver soit stocké dans le sol à court ou à long terme, ou encore être perdu dans l'eau ou l'atmosphère. Il est possible d'estimer la contribution azotée des CC aux cultures selon différentes méthodes (voir section A). À partir des données disponibles pour les essais de CC effectués dans le maïs, nous avons vérifié quels facteurs avaient le plus d'impact sur la contribution azotée des CC et ce, selon différentes méthodes de calcul (Tableau 19).

Les caractéristiques des CC (type, espèce, APA, C/N) et le délai entre la destruction de la CC et le semis du maïs sont apparus comme les facteurs les plus influents pour la contribution azotée des CC au maïs (Tableau 19). La quantité d'azote accumulée dans la biomasse aérienne des CC (APA) est apparue comme un des facteurs les plus déterminants et ce, pour les trois méthodes de calcul (équivalent en azote minéral (ENM), crédit d'azote minéral (CNM) et crédit apparent d'azote (CAN)). Il est donc plus important de tenir compte de l'APA que de la biomasse seule des CC. Une autre précision doit aussi être faite en lien avec la destruction et l'incorporation de la CC. Dans notre analyse, le délai entre la destruction de la CC et le semis du maïs a tenu compte de toutes les méthodes de destruction (incorporation par labour ou autre, fauche, herbicides, gel hivernal) alors que le délai entre l'incorporation de la CC et le semis du maïs n'a tenu compte que des CC qui ont été incorporées dans le sol. Par contre, compte tenu d'un nombre restreint d'observations en lien avec le délai de destruction, plus de données seront nécessaires afin de tirer des conclusions valables. Enfin, l'ENM semble être modulé aussi par les précipitations, ce qui suggère que la performance des CC sera différente entre les années sèches et humides.

Tableau. 19. Facteurs modulant la contribution azotée des CC au maïs

Facteurs modulant la contribution azotée des CC	Équivalent en azote minéral (ENM) kg N/ha				Crédit d'azote minéral (CNM) kg N/ha				Crédit apparent d'azote (CAN) kg N/ha			
	No.	dl	Valeur F	Pr > F	No.	dl	Valeur F	Pr > F	No.	dl	Valeur F	Pr > F
Caractéristiques des CC												
Type de CC (légumineuse, mélange, etc.)	259	247	24.55	<0.001 ***	130	109	23.32	<0.001 ***	101	93.2	11.38	<0.001 ***
Système de CC (dérobée, intercalaire, etc.)	259	66.5	2.11	0.1288 t	130	8.78	1.27	0.3289 ns	101	3.4	0.35	0.7270 ns
Espèce de CC (trèfle, vesce, etc.)	259	169	5.44	<0.001 ***	130	68.9	3.17	0.0005 ***	101	64	2.04	0.0215 *
Qté de N dans la biomasse aérienne de CC (APA)	191	181	68.08	<0.001 ***	130	126	22.22	<0.001 ***	101	94.4	22.09	<0.001 ***
Biomasse aérienne de la CC	184	146	4.77	0.0306 *	130	110	1.21	0.2736 ns	95	23	0.55	0.9702 ns
Rapport carbone/azote de la CC	89	83.8	44.72	<0.001 ***	79	76.9	21.18	<0.001 ***	56	41	0.72	0.7457 ns
Type de CC x APA	188	122	2.52	0.0327 *	130	123	2.72	0.0697 t	93	77.4	0.63	0.6410 ns
Type de CC x système de CC	259	117	2.15	0.1211 t	Classes sous-représentées				Classes sous-représentées			
Espèce de CC x système de CC	259	201	3.97	0.0040 **	Classes sous-représentées				Classes sous-représentées			
Gestion des CC												
Délai entre destruction de la CC et semis du maïs	139	121	15.33	<0.001 ***	103	34	0.30	0.9310 ns	44	28.9	11.75	0.0018 **
Délai entre incorporation de la CC et semis du maïs	73	20.5	1.91	0.1820 ns	26	24	1.05	0.3165 ns	Classes sous-représentées			
Délai entre destruction de CC et incorporation de CC	143	122	0.04	0.8410 ns	26	24	1.89	0.1816 ns	Classes sous-représentées			
Propriétés et gestion du sol												
Travail de sol (conventionnel, semis direct)	259	6.66	0.04	0.8497 ns	130	13.8	0.40	0.5378 ns	101	6.13	0.54	0.4883 ns
Système de production (biologique vs. conventionnel)	259	50.3	0.27	0.6056 ns	Classes sous-représentées				Classes sous-représentées			
Texture du sol	259	22.1	1.62	0.2202 ns	Classes sous-représentées				Classes sous-représentées			
Matière organique du sol (MO)	223	12.3	1.90	0.1912 ns	Classes sous-représentées				Classes sous-représentées			
Conditions climatiques												
PABD ¹ , mm	197	65.5	3.87	0.0130 *	130	105	0.54	0.6531 ns	Classes sous-représentées			
Température de l'air, Celsius (Moyenne 30 ans)	259	11.5	0.71	0.5136 ns	130	8.54	1.74	0.2324 ns	Classes sous-représentées			

Effet significatif: Pr < 0.001***, Pr < 0.01**, Pr < 0.05*, t = Pr = 0.1, and ns = non-significatif

No., Nombre total d'observations utilisées

dl, degré de liberté

¹PABD, précipitation abondante et bien distribuée (Tremblay et al., 2012) calculée entre la date de semis de la CC et la récolte de maïs.

PABD = [précipitation totale (année 1 + année 2)] * Indice de Shannon (indice de distribution)

Influence des caractéristiques des CC sur l'apport d'azote au maïs

Les estimés d'équivalent en azote minéral (ENM) dépendant principalement du type de CC (Tableau 20). Les légumineuses montrent les ENM les plus élevés, suivis par les mélanges et les non-légumineuses. Les graminées n'ont pas vraiment de contribution azotée pour le maïs qui est considérée comme égale à 0 (différence non significative). L'ENM moyen des légumineuses est de 86 kg N/ha et ne diffère pas significativement d'un système à l'autre, variant en moyenne de 78 à 102 kg N/ha. Considérant l'intervalle de confiance à 95 % (IC), l'ENM des légumineuses peut varier de 54 à 145 kg N/ha.

Les mélanges avec légumineuses, principalement évalués dans le système en dérobée, procurent un ENM moyen de 57 kg N/ha mais la contribution azotée peut varier de 21 à 97 kg N/ha (Tableau 20). Les CC non légumineuses ont un ENM un peu plus faible de 34 kg N/ha avec un écart de 2 à 66 kg N/ha. Toutefois, ces estimés sont basés sur un nombre restreint d'observations, révélant l'importance d'avoir de futures recherches sur les mélanges de CC et sur les CC non-légumineuses incluant le groupe des crucifères.

Enfin, l'ENM est corrélé négativement avec le rapport C/N des CC, indiquant que plus le rapport C/N est élevé, plus l'ENM sera faible. Selon nos résultats, l'ENM des CC devient nul lorsque le rapport C/N des CC est plus élevé que 28.

Tableau 20. Équivalent en azote minéral (EM) de différents types et systèmes de CC précédant une culture de maïs

Types de CC	Système CC	N _o	N _s	ENM (et)	(IC)	Pr > t
Légumineuses	Tout système	90	13	86 (6) (69 - 100)	A	***
	<i>En dérobée</i>	46	6	90 (11) (67 - 114)	a	***
	<i>Intercalaire</i>	32	6	78 (11) (54 - 102)	a	***
	<i>Pleine saison</i>	12	2	102 (20) (59 - 145)	a	***
Mélange avec légumineuses	Tout système	27	4	57 10 (39 - 79)	B	**
	<i>En dérobée</i>	24	3	59 (10) (21 - 97)	ab	*
	<i>Intercalaire</i>	3	1			
Non-légum.	<i>En dérobée</i>	9	3	34 16 (2 - 66)	B	bc *
Graminées	<i>En dérobée</i>	64	8	-4 8 (-21 - 13)	C	c ns

Les moyennes avec une même lettre majuscule ne sont pas significativement différentes entre les types de CC, peu importe le système (test lsd, alpha=0.05). Les moyennes avec une même lettre minuscule ne sont pas significativement différentes pour l'interaction type de CC x système de CC (test lsd, alpha=0.05).

L'ENM a été calculé lorsqu'il y avait deux études et plus qui rapportaient des observations permettant de calculer l'ENM. Les moyennes d'ENM calculées à partir de quelques études doivent être considérées avec précaution en considérant les variations indiquées avec l'intervalle de confiance (IC).

N_o Nombre total d'observations utilisées

N_s Nombre total d'études utilisées

et Erreur type de la moyenne

IC Intervalle de confiance ($\alpha=0.05$) entre les limites inférieures et supérieures

Pr > |t| Réfère au test de t qui vérifie l'hypothèse nulle, à l'effet que l'ENM égale 0.

*Différence significative à Pr < 0.001***, Pr < 0.01** et Pr < 0.05*, ns = non significatif*

Un effet très significatif a été obtenu entre la quantité d'azote accumulée dans la biomasse aérienne (APA) des CC et leur contribution azotée au maïs calculé selon différentes méthodes. Le tableau 21 présente ce lien pour différentes catégories d'APA (< 50 kg N/ha jusqu'à > 200 kg N/ha). Bien que nous sommes conscients de la variabilité des situations rencontrées sur le terrain et que l'APA n'est pas toujours garant de l'apport d'azote, compte tenu de la variabilité pédo-climatique, ces résultats permettent de préciser tout de même certaines balises.

Les estimés d'équivalent en azote minéral (ENM) semblent liés à l'APA des CC (Tableau 21). De façon générale, l'ENM augmente au fur et à mesure que l'APA des CC augmente. L'ENM le plus élevé correspond à la catégorie des CC qui a un APA supérieur à 200 kg N/ha mais il y a peu d'observations qui ont été faites dans cette catégorie sous un climat tempéré humide. Toutefois, des contributions substantielles en N (ENM de 58 à 118 kg N/ha) ont été estimées pour les CC ayant un APA entre 100 et 200 kg N/ha (environ 35 % des observations). Pour la catégorie d'APA de 50 à 99 kg N/ha, souvent rencontrée sous nos conditions, on obtient un ENM variant entre 14 et 75 kg N/ha (moyenne de 44 kg N/ha).

Les légumineuses obtiennent un ENM élevé en lien avec l'APA, soit une moyenne de 71 kg N/ha pour un APA variant entre 50 et 99 kg N/ha et 91 kg N/ha pour un APA entre 100 et 199 kg N/ha (Tableau 21). Les estimés d'ENM pour les mélanges avec légumineuses ne sont pas significativement différents de ceux des légumineuses, compte tenu de la grande variabilité des valeurs. Le nombre restreint des études ayant documenté l'ENM des mélanges pour cette méta-analyse nous empêche de fournir un estimé robuste pour ce type de CC. Bien que quelques études ont rapporté des contributions azotées des non-légumineuses (Scott et al., 1987; Richards et al., 1996; Thilakarathna et al., 2015), avec une valeur moyenne de 34 kg N/ha (Tableau 20), il n'a pas été possible de faire un lien entre l'ENM et l'APA pour ce type de CC. Les graminées n'ont pas vraiment de contribution azotée, selon les valeurs d'ENM obtenues pour les différentes catégories d'APA, et ce, probablement à cause de leur rapport C/N plus élevé (Waggoner, 1989, Kuo et al., 1996). Les valeurs négatives d'ENM des graminées suggèrent une immobilisation de l'azote (Waggoner, 1989; Dapaah et Vyn, 1998). Cependant, cet effet d'immobilisation de l'azote est souvent observé en absence d'autres sources d'azote appliquées au maïs, comme c'est le cas dans le calcul de l'ENM. Avec une fertilisation minérale azotée, Waggoner (1989) a rapporté une contribution significative du seigle au rendement du maïs.

En se basant sur les estimés de crédit d'azote minéral (CNM), calculés avec la méthode 2 qui estime de façon plus précise les effets non azotés des CC, on obtient une contribution azotée généralement plus élevée que celle obtenue avec l'ENM, sauf pour la catégorie d'APA au-dessus de 200 kg N/ha (Tableau 21). Le CNM des légumineuses avec un APA inférieur à 50 kg N/ha atteint une valeur moyenne de 84 kg N/ha (valeur 1,6 fois plus élevée comparé à l'ENM) mais avec une plus grande variabilité. Le CNM des légumineuses avec un APA entre 50 et 99 kg N/ha atteint une valeur de 100 kg N/ha (1,4 fois l'estimé de l'ENM) alors que le CNM des légumineuses avec un APA entre 100 et 199 kg N/ha atteint une valeur de 122 kg N/ha (1,3 fois plus élevé que l'ENM). Contrairement à l'ENM, les CNM des mélanges avec légumineuses avec un APA entre 100 et 199 kg N/ha sont significativement plus faibles que les CNM des légumineuses avec un APA similaire, alors qu'il n'y a pas de différence pour la catégorie d'APA de 200 kg N/ha et plus (Tableau 21).

Enfin, les estimés de crédit apparent d'azote (CAN) sont souvent plus faibles que ceux de l'ENM (Tableau 21). Des études supplémentaires seraient nécessaires pour fournir des valeurs plus robustes de CAN. En considérant le nombre d'études, ce sont les estimés d'ENM qui sont le plus souvent rapportés pour la contribution azotée des CC. Ces estimés sont basés sur des sites présentant différents types de réponse de rendement du maïs aux CC et à la fertilisation azotée (Figure 9).

Tableau 21. Lien entre la quantité d'azote accumulée dans la biomasse aérienne des CC (APA) et les estimés de contribution azotée déterminés selon trois méthodes (ENM, CNM et CAN)

APA, kg N/ha	Équivalent en azote minéral (ENM), kg N/ha					Crédit d'azote minéral (CNM), kg N/ha					Crédit apparent d'azote (CAN), kg N/ha				
	Méthode 1, Shroder et al. (1966)					Méthode 2, Smith et al. (1987)					Méthode 3, Genby et al. (2003)				
	N _o	N _e	Moy.	Méd.	Pr > t	N _o	N _e	Moy.	Méd.	Pr > t	N _o	N _e	Moy.	Méd.	Pr > t
< 50	69	12	19	13	ns	36	7	25	0	ns	21	4	31	21	ns
Légumineuses	17	6	63	49	ns	9	2	87	128	ns	5	2	16	2	ns
Non-légumineuses	4	1	54	57	bc	0	0	0	0	ns	0	0	0	0	ns
Graminées	48	8	0	0	ns	27	5	5	0	ns	16	2	30	26	ns
50-99	46	10	65	77	ns	19	8	86	95	ns	18	5	44	37	ns
Légumineuses	34	8	83	89	ns	15	7	106	107	ns	14	5	26	6	ns
Mélanges avec légum.	2	2	53	53	ab	2	1	24	24	ns	2	1	70	70	ns
Non-légumineuses	1	1	69	69	abcd	0	0	0	0	ns	0	0	0	0	ns
Graminées	9	5	< 0	5	ns	2	1	0	0	ns	2	2	2	2	ns
100-199	67	9	64	69	ns	66	9	105	118	ns	50	4	68	59	ns
Légumineuses	39	8	86	100	ns	38	7	128	148	ns	29	4	71	60	ns
Non-légumineuses	3	1	< 0	< 0	a	2	1	136	136	ns	1	1	< 0	< 0	ns
Graminées	25	3	49	50	ns	26	4	70	56	ns	20	2	59	48	ns
Mélanges avec légum.	3	1	< 0	< 0	ab	2	1	136	136	ns	2	1	< 0	< 0	ns
Non-légumineuses	7	4	108	110	ns	9	5	61	62	ns	12	2	75	79	ns
Graminées	7	4	108	110	ns	9	5	61	62	ns	12	2	75	79	ns
≥ 200	7	4	108	110	ns	9	5	61	62	ns	12	2	75	79	ns
Légumineuses	4	3	120	112	ns	6	4	69	77	ns	7	1	90	93	ns
Non-légumineuses	3	2	91	85	ns	3	2	46	46	ns	5	2	54	77	ns
Graminées	3	2	91	85	ns	3	2	46	46	ns	5	2	54	77	ns

Les moyennes avec une même lettre minuscule ne sont pas significativement différentes entre les catégories d'APA, peu importe le type de CC (test lsd, alpha=0.05).
Les moyennes avec une même lettre majuscule ne sont pas significativement différentes selon l'interaction APA et type de CC (test lsd, alpha=0.05).
L'ENM, le CNM et le CAN ont été calculés seulement lorsqu'il y avait deux études et plus qui rapportaient des observations permettant de faire ces calculs. Les estimés calculés à partir de quelques études doivent être utilisés avec précaution en considérant les variations indiquées par l'intervalle de confiance.
N_o Nombre total d'observations utilisées.
N_e Nombre total d'études utilisées.
Moy. Moyenne.
Méd. Erreur type de la moyenne.
et Intervalle de confiance (alpha=0.05) entre les limites inférieures et supérieures.
IC Intervalle de confiance (alpha=0.05) entre les limites inférieures et supérieures.
Pr > |t| Réfère au test de t qui vérifie l'hypothèse nulle, à l'effet que l'apport en N égale 0. Différence significative à Pr < 0.001***, Pr < 0.01**, Pr < 0.05*, Pr = 0.1 (t) = tendance, et ns = non significatif

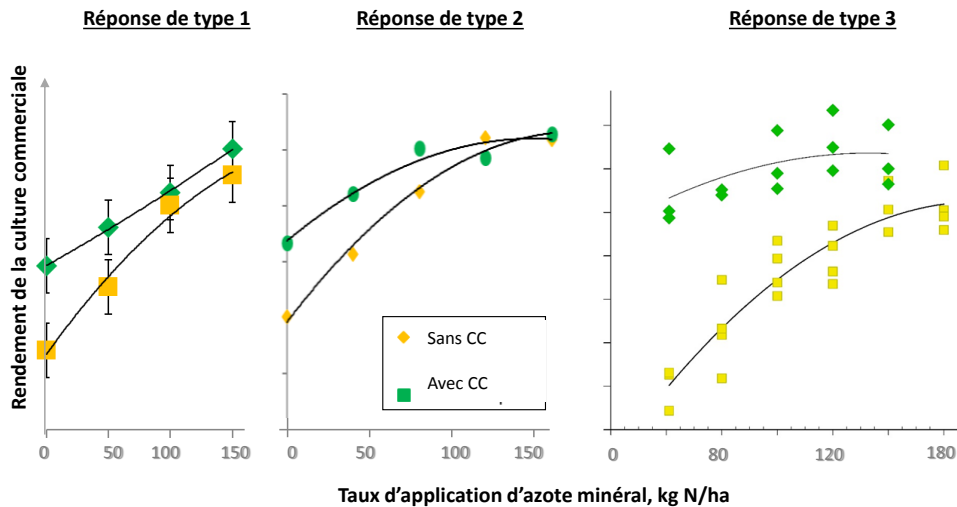


Figure 9. Différents types de réponse de rendement du maïs aux CC et à la fertilisation azotée

Dans le cas d'une réponse linéaire (Type 1), i.e. lorsque le rendement maximal du maïs n'est pas atteint durant l'expérience (Clark et al., 1997a, 1997b; Gaudin et al., 2015), des pertes possibles d'azote causées par des précipitations élevées peuvent mener à des contributions azotées des CC plus faibles que celles obtenues avec une réponse quadratique traditionnelle (Type 2), particulièrement avec des sols à texture grossière qui favorisent le lessivage des nitrates (Andraski et Bundy, 2005). Dans le cas d'une réponse quadratique (Type 2), un effet significatif de la CC est observé jusqu'à un certain niveau d'azote appliqué (Scott et al., 1987; Gaudin et al., 2015; N'Dayegamiye et al., 2015). Dans le cas d'une réponse de type 3, la présence de CC entraîne un rendement de maïs plus élevé peu importe l'azote appliqué, suggérant la présence d'effets non azotés de la CC (Utomo et al., 1990; Tiffin et Hesterman, 1998).

Nous avons vérifié si l'ENM, qui est l'estimé le plus rapporté dans la littérature pour la contribution azotée des CC de légumineuses, pouvait varier significativement selon le type de réponse du rendement du maïs (avec et sans CC) à l'augmentation des niveaux d'engrais minéral azoté (Tableau 22).

Tableau 22. Équivalent en azote minéral (ENM) des CC légumineuses et ratio de rendement du maïs selon le type de réponse du maïs à la fertilisation azotée minérale

Type de réponse du maïs	N _o	N _s	Équivalent en azote minéral kg N/ha			RR ± <u>écart-type</u>	Provenance des observations
			ENM ₀₋₆₀ (et)	(IC)	Pr > t		
Type 1	72	8	57 (11)	(35 - 79)	*** B	1.2 ± 0.3	Middle Atl. ÉU (90%), Canada (10%)
Type 2	172	19	65 (9)	(48 - 83)	*** B	1.4 ± 0.4	Mid Atl. ÉU (39%), Canada (30%), Mid-Ouest ÉU (25%), Sud-est ÉU (7%)
Type 3	4	2	164 (28)	(108 - 220)	*** A	1.7 ± 0.4	Québec (60%), Maryland (40%)

Nous avons considéré tous les systèmes de CC avec maïs qui avaient reçu des taux d'azote minéral entre 0 et 60 kg N/ha afin d'avoir un nombre suffisant d'observations et d'études.

Les moyennes avec une même lettre ne sont pas significativement différentes selon le test lsd (alpha=0.05).

N_o Nombre total d'observations utilisées

N_s Nombre total d'études utilisées

et Erreur-type de la moyenne

IC Intervalle de confiance (α=0.05) entre les limites inférieures et supérieures

Pr > |t| Réfère au test de t qui vérifie l'hypothèse nulle, à l'effet que l'apport en N égale 0. Différence significative à Pr < 0.001***, Pr < 0.01**, Pr < 0.05*, Pr = 0.1 (t) = tendance, and ns = non significatif

Lorsque les CCs sont très bénéfiques aux rendements du maïs et que des effets non-azotés sont suspectés (Type 3), l'ENM des légumineuses est 2,7 fois plus élevé que l'ENM obtenu avec les types de réponse 1 et 2. De la même façon, les augmentations de rendement du maïs atteintes avec les CCs sont deux à quatre fois plus élevées (70% ± 40%) avec la réponse de type 3 en comparaison avec les réponses de types 1 et 2. Il n'y a pas de différence significative entre les ENM des CC légumineuses observés lorsque la réponse de rendement du maïs est linéaire (Type 1) et quadratique (Type 2). Toutefois, il faut bien comprendre qu'afin de pouvoir comparer les différentes courbes de réponses, et d'avoir un nombre d'observations (No) suffisant, l'ENM a été calculé pour des niveaux d'azote minéral se situant entre 0 et 60 kg N/ha appliqué au maïs. L'estimé d'ENM calculé pour le type 3 représente seulement 2 % du nombre total d'ENM rapporté (n=274) et 3 % du nombre total d'ENM rapporté pour les légumineuses (n=135) dans les régions où le PABR se situe entre 800 et 1000 mm, i.e. près des normales. L'ENM estimé pour le type 3 a été obtenu en présence de légumineuses seules (n=4) ou combinées avec le radis (n=1). Plus spécifiquement, cet ENM réfère à des légumineuses de vesce velue, de pois fourrager et de trèfle incarnat (Clark et al., 2007a, b; Bérubé, 2015). La biomasse aérienne moyenne de ces légumineuses était de 3146 kg/ha (IC=2278 à 4014, $\alpha=0,05$) ce qui est significativement plus élevé que la biomasse moyenne des CC obtenue avec les ENM du type 1 (2391 kg/ha, IC=1511 à 3171, $\alpha=0,05$).

La contribution azotée varie aussi selon les espèces de CC (Tableau 23). La vesce velue implantée avec un système en dérobée ou le trèfle rouge semé en intercalaire dans les céréales ont obtenu l'ENM le plus élevé, soit près de 80 kg N/ha (Tableau 23), avec un IC (95 %) se situant approximativement entre 50 et 110 kg N/ha. La contribution azotée de la luzerne semée en intercalaire dans les céréales atteint 62 kg N/ha avec un IC (95%) se situant approximativement entre 25 et 100 kg N/ha. Le mélange de vesce velue et de seigle fournit une contribution azotée plus faible de 52 kg N/ha (écart entre 25 et 87) mais demeure significative. Selon les études considérées, le trèfle incarnat obtenait un ENM qui n'était pas significatif.

Tableau 23. Contribution azotée de différentes espèces de CC selon trois méthodes (ENM, CNM, CAN)

Espèce de CC	Equivalent en azote minéral (ENM), kg N/ha Méthode 1, Strader et al. (1986)							Crédit d'azote minéral (CNM), kg N/ha Méthode 2, Smith et al. (1987)							Crédit apparent d'azote (CAN), kg N/ha Méthode 3, Gentry et al. (2003)							
	N _e	N _s	Moy	Méd	ENM (et)	(IC)	Pr > t	N _e	N _s	Moy	Méd	CNM (et)	(IC)	Pr > t	N _e	N _s	Moy	Méd	CAN (et)	(IC)	Pr > t	
En dérobée[†]																						
Vesce velue	34	6	83	100	78 (14)	(54 - 111)	A ***	32	5	125	147	114 (18)	(73 - 156)	A ***	29	4	78	65	85 (11)	(63 - 107)	A ***	
Seigle	37	6	-24	-15	-29 (14)	(-58 - -1)	C *	28	5	13	0	10 (18)	(-32 - 51)	C ns	20	2	26	15	31 (12)	(7 - 56)	B *	
Vesce velue/seigle	27	3	57	59	52 (15)	(25 - 87)	B ***	23	3	66	49	67 (20)	(22 - 111)	B **	20	1	72	53				
Intercalaires dans céréales																						
Trèfle rouge	29	6	70	89	79 (16)	(47 - 112)	AB ***	9	3	65	62	101 (35)	(26 - 117)	AB *	6	1	36	19				
Luzerne	22	3	38	49	62 (18)	(26 - 99)	AB **	4	1	94	95				6	1	25	21				
Trèfle incarnat	14	4	-32	-6	-5 (17)	(-39 - 30)	C ns	3	2	67	93											

Les estimés de la méta-analyse ont été calculés lorsque le nombre d'études disponibles était supérieur ou égal à deux. Les estimés calculés à partir de quelques études doivent être utilisés avec précaution en considérant les variations indiquées par l'intervalle de confiance.

Les moyennes avec une même lettre ne sont pas significativement différentes selon le test LSD ($\alpha=0,05$).

N_e, nombre total d'observations utilisées

N_s, nombre total d'études utilisées

Moy., moyenne des données brutes

Méd., médiane calculée à partir des données brutes

et, erreur type de la moyenne

IC, intervalle de confiance ($\alpha=0,05$) entre les limites inférieures et supérieures

Pr > |t|[†] Réfère au test de t qui vérifie l'hypothèse nulle, à l'effet que l'apport en N égale 0. Différence significative à Pr < 0.001***, Pr < 0.01**, Pr < 0.05*, Pr = 0.1 (t) = tendance, and ns = non significatif

[†] Les observations réfèrent principalement à des systèmes où les CC sont implantées en dérobée après le maïs (études aux ÉU)

Les estimés d'ENM, de CNM et de CAN procurent des valeurs de contribution azotée assez comparables pour les CC légumineuses (seules ou en mélange) mais différent pour les CC graminées (Tableau 23). La contribution azotée du seigle implanté avec un système en dérobée est négative, nulle ou légèrement positive (entre 7 et 56 kg N/ha) selon les estimés d'ENM, de CNM et de CAN, respectivement. Considérant le nombre restreint d'études sur lesquelles sont basés les calculs de CAN, de futures recherches seraient nécessaires pour produire un estimé plus robuste. Quelques différences ont aussi été observées pour la contribution azotée de la vesce velue dont l'estimé d'ENM était de 78 kg N/ha (variant de 54 à 111 kg N/ha), assez similaire au CAN de 85 kg N/ha (écart entre 63 et 107 kg N/ha) mais 1,5 fois moins élevé que l'estimé de CNM de 114 kg N/ha (écart entre 73 et 156 kg N/ha). L'estimé de CNM est plus précis que l'estimé de l'ENM en présence d'effets non-azotés. Cependant, l'estimé de CNM est souvent basé sur quelques observations car il ne considère pas les sites où le rendement maximum n'est pas atteint (Garand et al., 2001). Étant donné que le nombre d'observations et d'études diffèrent selon les trois méthodes d'estimation de contribution azotée, de futures recherches sont nécessaires pour fournir des estimés plus robustes de contribution azotée au niveau des espèces de CC, en particulier pour les CC graminées.

Influence du temps de destruction des CC sur l'apport d'azote au maïs

Lors de l'analyse, le temps de destruction de la CC semblait un paramètre de gestion significatif pour la contribution azotée au maïs (Tableau 19). Par contre, il y a peu d'études qui ont considéré cet aspect en vue d'établir la contribution azotée à la culture subséquente. Bien que les valeurs de contribution azotée soient légèrement différentes selon les périodes de destruction des CC légumineuses, il semble ne pas y avoir de différence significative entre les valeurs d'ENM obtenues pour la période automnale (73 kg N/ha) vs la période printanière (79 à 107 kg N/ha) (Tableau 24). Il existe cependant une grande variabilité de réponse selon les études. Les mélanges avec légumineuses (avec tout système de CC) obtiennent un ENM 3,5 fois plus élevé lorsque les CC sont détruites au début d'avril par rapport au début de mai (Tableau 25). Il semble nécessaire de laisser un temps plus long avant le semis du maïs afin de permettre la décomposition et la minéralisation des CC composant les mélanges. Des études additionnelles en lien avec le délai de destruction seront nécessaires (particulièrement au niveau des espèces de CC) pour préciser ces observations et estimés.

Tableau 24. Impact de la période de destruction des CC sur la contribution azotée des CC de légumineuses dans le maïs (*tous les systèmes de CC*)

Délai destruction CC (avant semis du maïs)	Nb de jours	N _o	N _s	Moy.	Méd.	ENM (kg N /ha)	(et)	(IC)	Pr > t	
Printemps										
Fin-avril/Mi-mai	<10 jrs	15	3	95	89	86	(24)	(37 – 135)	**	A
Mi-avril/Début-mai	10-20	30	7	79	105	79	(16)	(45 – 113)	***	A
Avril	21-30	9	3	100	112	107	(22)	(63 – 151)	***	A
Automne										
Novembre	161-200	10	2	83	71	73	(22)	(28 – 117)	**	A

Les estimés de la méta-analyse ont été calculés lorsque le nombre d'études disponibles était supérieur ou égal à deux. Les estimés calculés à partir de quelques études doivent être utilisés avec précaution en considérant les variations indiquées par l'Intervalle de confiance.

Les moyennes avec une même lettre ne sont pas significativement différentes selon le test lsd (alpha= 0,05)

N_o : nombre d'observations, ce nombre correspond aux moyennes des traitements rapportées dans les études sélectionnées;

N_s : nombre total d'études utilisées

Moy. : Moyenne

Méd. : Médiane

ENM : équivalent en azote minéral

Et : erreur-type de la moyenne

IC : intervalle de confiance ($\alpha = 0,05$) entre les limites inférieures et supérieures

Pr > |t| indique si l'ensemble des observations à l'étude a un ENM significativement différent de 0, avec: ***, hautement significatif (P<0.001) et **, très significatif.

Tableau 25. Impact de la période de destruction des mélanges avec légumineuses sur la contribution azotée de ces CC dans le maïs (*tous les systèmes de CC*)

Période de destruction de la CC		N _o	N _s	ENM (et)	(IC)	Pr > t
				kg N/ha		
Mi-avril / Début mai	10-20 jrs	12	3	22 (23)	(-31 - 74)	ns B
Début avril	31-60 jrs	13	3	72 (21)	(21 - 123)	* A

Les estimés de la méta-analyse ont été calculés lorsque le nombre d'études disponibles était supérieur ou égal à deux. Les estimés calculés à partir de quelques études doivent être utilisés avec précaution en considérant les variations indiquées par l'intervalle de confiance.

Les moyennes avec une même lettre ne sont pas significativement différentes selon le test lsd ($\alpha=0.05$).

N_o nombre total d'observations utilisées

N_s nombre total d'observations utilisées

et erreur type de la moyenne

IC intervalle de confiance ($\alpha=0.05$) entre les limites inférieures et supérieures

Pr > |t| Réfère au test de t qui vérifie l'hypothèse nulle, à l'effet que l'apport en N égale 0. Différence significative à Pr < 0.001***, Pr < 0.01** and Pr < 0.05*, ns = non significatif

Influence des conditions climatiques sur l'apport d'azote des CC au maïs

Les conditions climatiques influencent la contribution azotée des CC au maïs (Tableau 19). Dans les années relativement sèches, lorsque les PABR_{tot} n'excèdent pas 800 mm, les CC n'ont aucune contribution azotée à la culture subséquente de maïs. De façon générale, l'ENM des CC augmente au fur et à mesure que le PABR_{tot} augmente (Figure 10). L'ENM des légumineuses demeure substantiel (entre 66 et 89 kg N/ha) lorsque les PABR_{tot} se situent entre 800 et plus de 1500 mm. L'ENM des mélanges avec légumineuses demeure moins élevé que les légumineuses et varie entre 46 et 70 kg N/ha pour des PABR_{tot} de 800 à plus de 1500 mm de (Figure 10). Plus d'études sur les mélanges avec légumineuses sont nécessaires pour confirmer ou non cette tendance.

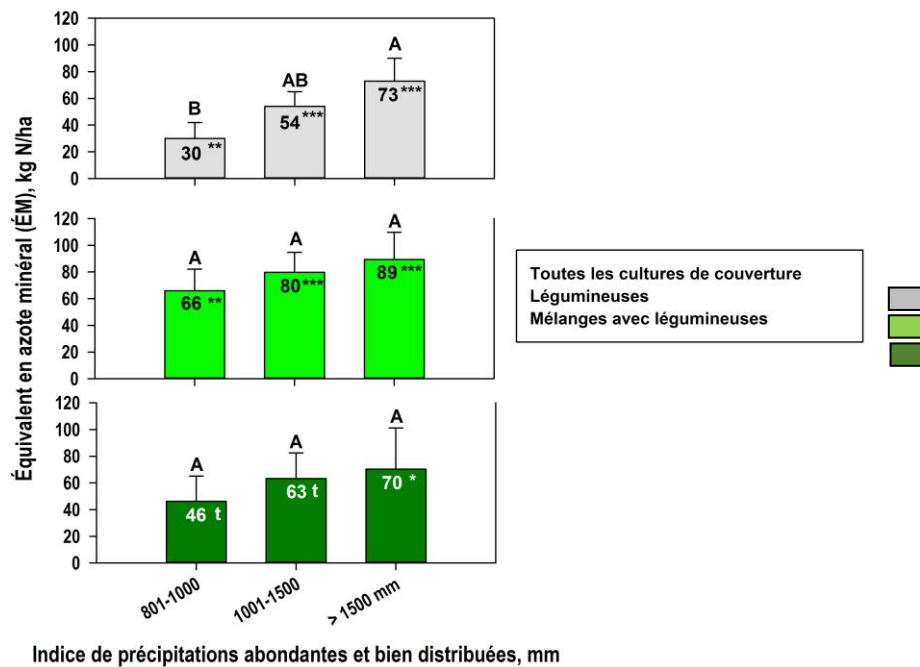


Figure 10. Impact des quantités totales de précipitations (PABR_{tot}) durant les saisons de croissance des CC et du maïs sur l'équivalent en azote minéral des CC.

Pour chaque type de CC, les moyennes avec une même lettre ne sont pas significativement différentes pour le test lsd ($\alpha=0.05$). Les symboles (***, **, *, et t) indiquent une différence significative à Pr < 0.001, Pr < 0.01, Pr < 0.05 et Pr < 0.10.

D- Contribution en azote des cultures de couverture pour les céréales

La contribution azotée des CC au rendement des céréales subséquentes a été beaucoup moins documentée que celle pour le maïs. Les informations et études disponibles qui permettaient de faire les estimés de contribution azotée sont présentées au tableau 26.

Les estimés d'équivalent en azote minéral (ENM) aux céréales subséquentes se situent entre -33 et 82 kg N/ha (Tableau 26). Le trèfle rouge, implanté en système intercalaire, semble se distinguer mais les ENMs demeurent très variables selon les études et années d'observation. La contribution azotée réelle des légumineuses semble varier selon l'espèce de CC et le système d'implantation et ne semble pas être en lien avec la quantité de biomasse produite ou l'APA de la CC (Tableau 26). Pour certaines études, cela suggère des effets indirects (autres que l'apport d'azote) et qui seraient en lien avec l'amélioration des propriétés du sol qui influencerait positivement la nutrition azotée et le rendement du blé (N'Dayegamiye et al., 2015). Comparativement avec le maïs, il est possible que la durée de croissance de la céréale ne permette pas une pleine valorisation de l'apport d'azote de la CC, surtout si cet azote est sous forme organique, contribuant à un arrière-effet pour les années subséquentes. Enfin, une seule étude a calculé le crédit d'azote minéral (CNM) du trèfle rouge qui s'est montré aussi très variable selon les années (Tableau 26).

Les graminées et autres espèces non légumineuses implantées en dérobée ont obtenu un ENM négatif mais ces données ne proviennent que d'une seule étude qui n'a pas inclus de fertilisation des CC (avec une fumure organique ou minérale). Tous ces résultats démontrent le manque de données provenant d'études qui ont fait des estimés de contribution azotée des CC aux céréales.

Tableau 26. Contribution azotée des CC aux cultures céréalières subséquentes (n=17, toutes les observations sont sous régie conventionnelle de travail du sol)

Auteurs et région de l'étude			Type de sol et culture			Caractéristiques des CC et contribution azotée							
			texture sol	MO [†] %	Culture*	Durée croissance	Destruction	Biomasse kg / ha	C/N	APA*	ENM	CNM	
										kg N /ha	kg N /ha	kg N /ha	
Intercalaire	Luzerne	N'Dayegamiye et al. (2015)	QC	Loam argileux	7.9	maïs	4 - 6 mois	Labour	3117	18	72	0	-
	Vesce velue	N'Dayegamiye et al. (2015)	QC	Loam argileux	7.9	maïs	4 - 6 mois	Labour	2196	16	59	0	-
	Trèfle incarnat	N'Dayegamiye et al. (2015)	QC	Loam argileux	7.9	maïs	4 - 6 mois	Labour	3772	21	71	0	-
	Pois	N'Dayegamiye et al. (2015)	QC	Loam argileux	7.9	blé	2 - 4 mois	Travail réduit	3868			7	
	Trèfle incarnat	N'Dayegamiye et al. (2015)	QC	Loam argileux	7.9	blé	4 - 6 mois	Travail réduit	2878			1	
	Vesce velue	N'Dayegamiye et al. (2015)	QC	Loam argileux	7.9	blé	2 - 4 mois	Travail réduit	3785	20		30	
	Trèfle rouge	Abdallahi and N'Dayegamiye (2000)	QC	Loam limoneux	4.1	céréales	2 - 4 mois	Labour	678	27	13	20	3
	Trèfle rouge	N'Dayegamiye and Tran (2001)	QC	Loam limoneux	4.1	céréales	5 - 6 mois	Coupe et labour	678	27	13	18	0
	Trèfle rouge	N'Dayegamiye and Tran (2001)	QC	Loam limoneux	4.1	céréales	4 - 6 mois	Coupe et labour	600	24	12	82	90
En dérobée	Colza	Richards et al. (1996)	UK	Loam sableux	1.5	céréales	-	Gel hivernal	1240		26	-6	
	Raygrass italien	Richards et al. (1996)	UK	Loam sableux	1.5	céréales	-	Gel hivernal	900		22	-17	
	Phacélie	Richards et al. (1996)	UK	Loam sableux	1.5	céréales	-	Gel hivernal	1280		35	-8	
	Seigle	Richards et al. (1996)	UK	Loam sableux	1.5	céréales	4 - 6 mois	Labour	840		31	-33	
	Moutarde blanche	Richards et al. (1996)	UK	Loam sableux	1.5	céréales	-	Gel hivernal	779		23	-2	
Plaine saison	Luzerne	N'Dayegamiye et al. (2015)	QC	Loam argileux	7.9	-	4 - 6 mois	Travail réduit	4423	14		23	
	Trèfle incarnat	N'Dayegamiye et al. (2015)	QC	Loam argileux	7.9	-	4 - 6 mois	Travail réduit	2557	18		0	
	Vesce velue	N'Dayegamiye et al. (2015)	QC	Loam argileux	7.9	-	4 - 6 mois	Travail réduit	2783	20		32	

[†]MO, matière organique du sol

* Culture réfère à la culture compagne dans le système intercalaire de CC et à la culture précédant la CC implantée en dérobée

[‡]APA réfère à la quantité d'azote accumulée dans la biomasse aérienne de la CC (kg N/ha)

ENM, équivalent en azote mnéral / CNM, crédit d'azote minéral

Certaines études ont estimé le crédit apparent d'azote (CAN) des CC à partir du prélèvement d'azote effectué par le blé, soit par la plante entière (Tableau 27) ou par les grains seulement (Tableau 28). Ces estimés de contribution azotés sont souvent plus faibles que les estimés de ENM ou de CNM. Que ce soit pour la plante entière ou les grains seulement, la contribution azotée des CC n'est pas significative ($P > t = n.s.$) sauf pour les graminées, qui démontrent une valeur moyenne négative lorsqu'on considère le prélèvement total (Tableau 27). Les CAN des légumineuses et des mélanges avec légumineuses se distinguent positivement de celui des graminées.

Tableau 27. Impact des espèces de CC sur le crédit apparent d'azote (CAN, prélèvement total) pour le blé

Types de CC	No	Ns	CAN (et)	(IC)	Pr > t	lsd (0.05)
			kg N/ha			
Légumineuses	46	5	7 (6)	(-6 - 20)	ns	A
Mélange avec légumineuse	18	2	3 (7)	(-12 - 19)	ns	AB
Graminées	13	4	-17 (7)	(-32 - -2)	*	C
Non-légumineuses	22	3	-10 (7)	(-24 - 4)	ns	BC

Les moyennes avec une même lettre ne sont pas significativement différentes selon le test lsd (alpha=0.05).

N_o nombre total d'observations utilisées
 N_s nombre total d'études utilisées
 et erreur type de la moyenne
 IC intervalle de confiance ($\alpha=0.05$) entre les limites inférieures et supérieures
 Pr > |t| Réfère au test de t qui vérifie l'hypothèse nulle, à l'effet que l'apport en N égale 0.
 Pr < 0.001***, Pr < 0.01** and Pr < 0.05*, ns = non significatif

Tableau 28. Impact des espèces de CC sur le crédit d'azote apparent (CAN, prélèvement par les grains) pour le blé

Types de CC	No	Ns	CAN _{Grain} (et)	(IC)	Pr > t	lsd (0.05)
			kg N/ha			
Légumineuses	24	3	7 (7)	(-21 - 35)	ns	A
Mélange avec légumineuse	10	1	6 (10)	(-19 - 30)	ns	AB
Graminées	9	2	-17 (9)	(-41 - 7)	ns	C
Non-légumineuses	20	2	-9 (8)	(-36 - 18)	ns	BC

Les moyennes avec une même lettre ne sont pas significativement différentes selon le test lsd (alpha=0.05).

N_o nombre total d'observations utilisées
 N_s nombre total d'études utilisées
 et erreur type de la moyenne
 IC intervalle de confiance ($\alpha=0.05$) entre les limites inférieures et supérieures
 Pr > |t| Pr < 0.001***, Pr < 0.01** and Pr < 0.05*, ns = non-significant

Si on considère les données au niveau des espèces de CC, on constate que le pois fourrager, la vesce velue et le mélange trèfle rouge/trèfle blanc augmentent le prélèvement de l'azote par le blé et ce, avec plus de 50 % des observations ayant des effets positifs sur le prélèvement total d'azote (Figure 11).

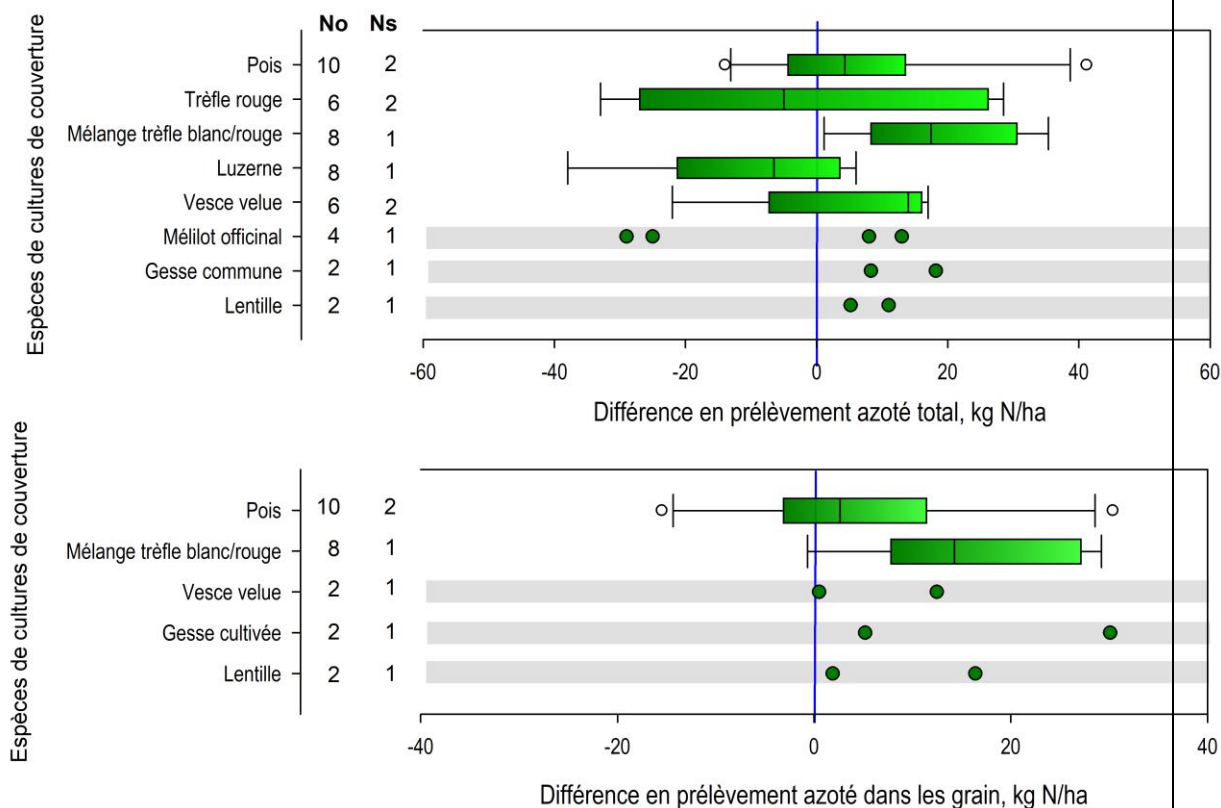


Figure 11. Impact des espèces de CC légumineuses sur le prélèvement de l'azote par le blé

Les ronds verts ont été employés pour la représentation graphique des données lorsque six observations ou moins avaient été reportées pour une espèce de CC particulière. Les boîtes à moustaches représentent les données lorsque le nombre d'observations disponibles pour une espèce donnée (No) dépassait six. La limite inférieure de la boîte verte (la plus proche de zéro, à gauche) représente le 25^{ème} percentile tandis que la limite supérieure de la boîte verte (à droite) représente le 75^{ème} percentile. Les moustaches (barres d'erreurs) à gauche et à droite de la boîte indiquent le 10^{ème} et le 90^{ème} percentile, respectivement. La ligne noire continue à l'intérieur de la boîte verte marque la médiane. Les observations extrêmes sont représentées par des points blancs.

En conclusion, la contribution azotée des CC dépend de plusieurs facteurs, dont les espèces et les systèmes d'implantation des CC, la durée de croissance de la CC, la texture du sol ainsi que les précipitations reçues durant l'année d'établissement de la CC et de la croissance de la culture subséquente. Les légumineuses, seules ou en mélange, offrent le plus grand potentiel, avec des apports potentiels en azote (quantité accumulée dans la biomasse aérienne des CC) pour la culture du maïs variant en moyenne de 74 à 91 kg N/ha, pour des équivalents en azote minéral (ENM) de l'ordre de 57 à 86 kg N/ha (calculés sans apport d'azote dans le maïs). L'ENM moyen des légumineuses peut toutefois varier de 24 à 157 kg N/ha selon les études. La relation entre la quantité d'azote enfouie et la contribution azotée réelle des CC à la culture subséquente n'est pas simple à établir, puisque la décomposition et la libération des nutriments, en plus de dépendre de facteurs intrinsèques tels que la qualité de la biomasse de la CC elle-même, est aussi influencée par des facteurs environnementaux tels que la température et les précipitations et des facteurs agronomiques tels que les propriétés du sol et le délai d'incorporation de la CC et le semis de la culture subséquente.

5.3. Effet des cultures de couverture sur la qualité des sols, les propriétés hydrauliques et le lessivage de l'azote (Objectif C)

Introduction

Les cultures de couverture (CC) offrent de nombreux services dans l'écosystème agricole. Leurs effets sur la qualité des sols peuvent se traduire sur les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol, entraînant des impacts tangibles sur la conservation des sols et la qualité de l'environnement. La figure 12 résume les bénéfices potentiels des CC en montrant que les effets sur les propriétés du sol sont souvent inter-reliés. Toutefois, les impacts des CC ne sont pas toujours mesurables et dépendent de plusieurs facteurs. La section qui suit résume les effets potentiels des CC sur certaines propriétés du sol à partir d'une revue de littérature basée sur des articles-synthèse et des études réalisées surtout en milieu tempéré.

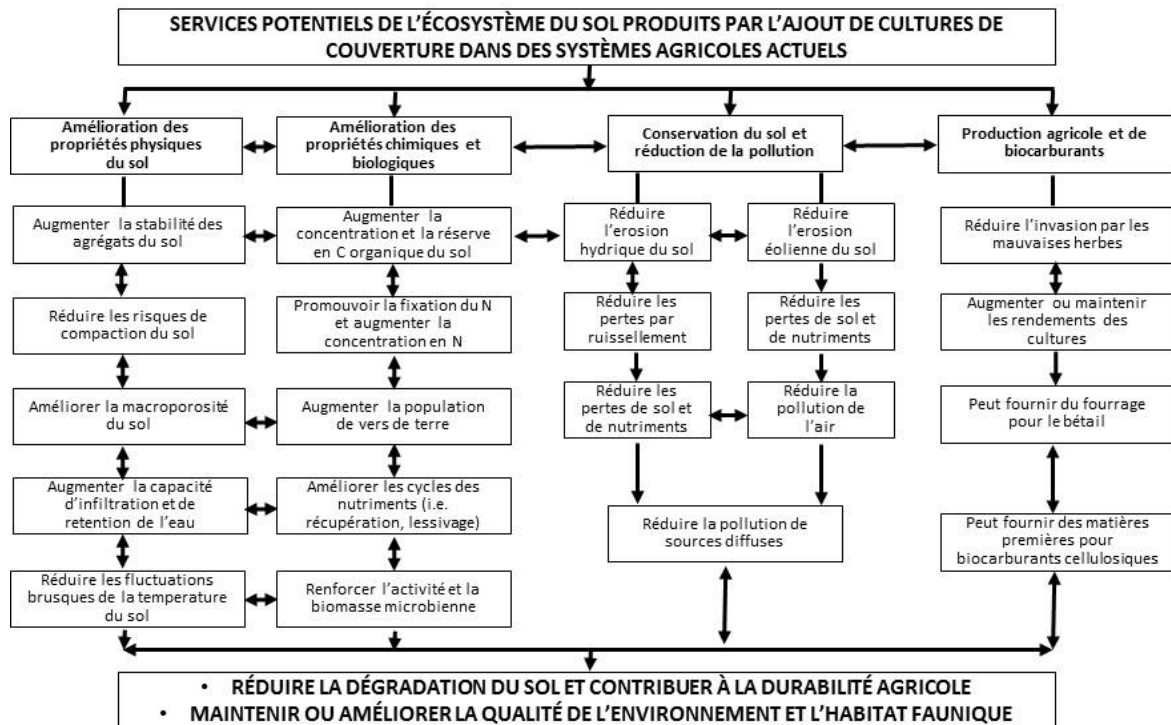


Figure 12. Effets des cultures de couverture sur les propriétés du sol, la réduction de la pollution et la production agricole. (Blanco-Canqui et al. 2015)

Effets des cultures de couverture sur la matière organique du sol

Sur une base annuelle, les CC augmentent l'apport de carbone au sol en remplaçant le sol nu par une production additionnelle de carbone, particulièrement entre les périodes normales de production des cultures (Lal, 2001). Contrairement aux amendements organiques, une grande partie de ce carbone est ajoutée via les racines des CC, qui contribuent plus efficacement au pool de carbone relativement stable que le carbone provenant de la biomasse aérienne (Kätterer et al., 2011). Toutefois, le bilan de carbone doit tenir compte de l'apport additionnel provenant à la fois de la partie aérienne et racinaire des CC.

Une synthèse récente de plusieurs études sur les CC en sols tempérés indique que l'ampleur de l'augmentation de carbone dans le sol provenant des CC dépend de plusieurs facteurs : (1) le nombre d'années avec CC, (2) la biomasse aérienne et racinaire des différentes espèces de CC, (3) le type de sol et le niveau de carbone initial du sol, (4) le travail du sol, et (5) le climat (Blanco-Canqui et al., 2015).

1. Le nombre d'années avec CC

Bien qu'à long terme, les CC augmentent généralement la concentration en carbone organique du sol (COS), leurs effets ne sont pas détectables dans les premières années après l'établissement (Acuna et Villamil, 2014). En général, les CC ont peu d'effet sur le COS à court terme (< 3 ans), la variabilité spatiale et

l'hétérogénéité du sol combiné à des échantillonnages restreints contribuent à la difficulté de détecter ces changements à court terme (Blanco-Canqui et al., 2015). C'est la raison pour laquelle les études de longue durée sont nécessaires pour documenter les effets des CC sur le COS.

Utilisant les données de 30 études effectuées sur 37 sites différents dont la durée d'essai a varié de 1 à 54 années, Poeplau et Don (2015) ont démontré que les traitements de CC avaient des stocks de carbone significativement plus élevés que les parcelles de référence sans CC. Le temps depuis l'introduction des CC dans la rotation des cultures était corrélé linéairement avec le changement de stock de COS, avec un taux moyen annuel de séquestration du carbone de $0,32 \pm 0,08$ t/ha/année à une profondeur moyenne de sol de 22 cm. Blanco-Canqui et al. (2015) rapportent, qu'en général, l'intégration des CC dans des systèmes en semis direct permettent une accumulation de carbone de 0,1 à 1,0 t/ha/année de plus que les systèmes en semis direct sans CC. Par contre, l'étude de Kuo et al. (1997) a montré que les effets des CC sur le carbone total du sol peuvent être relativement faibles. Après sept années consécutives de maïs avec CC, le contenu en carbone du sol avait augmenté de 3 à 5 % dans les 15 premiers centimètres, même si la biomasse aérienne (4 t/ha) et racinaire (4 à 5 t/ha) des CC était assez élevée.

Une autre étude a montré l'impact à long terme des CC, à l'aide d'une simulation effectuée pour une rotation maïs-soya aux États-Unis (région du Corn Belt) dans le cadre de changements climatiques survenant sur une période de 45 ans, soit entre 2015 et 2060 (Basche et al., 2016). Cette simulation a mis en évidence que le COS diminuait dans les deux systèmes de culture (maïs-soya avec ou sans CC de seigle d'automne implanté en septembre-octobre après chaque culture). Toutefois, cette diminution de la masse de carbone (dans la couche 0-15 cm) était de 6 % dans le système sans CC alors qu'elle ne représentait que 3 % dans le système avec CC. La diminution du COS résulterait des augmentations de la température du sol qui accéléreraient la décomposition du carbone. La CC ne pourrait pas complètement annuler cet effet. Cette diminution de COS pourrait aussi résulter de l'effet adverse du climat sur les rendements des cultures, ce qui se traduirait par un retour de résidus moins élevé au sol. Par contre, la CC de seigle d'automne présente un bon potentiel comme stratégie d'adaptation pour ralentir les pertes de carbone du sol. Selon cette étude, la CC permettrait aussi de réduire l'évaporation du sol entre 2-18 %, les plus fortes réductions étant enregistrées dans les années plus sèches (Basche et al., 2016).

2. La biomasse aérienne et racinaire des différentes espèces de CC

La quantité et la qualité des résidus (rapport C/N, teneur en lignine et hémicellulose) apportés au sol affectent l'accumulation du carbone dans le sol. Le taux de décomposition des résidus de CC qui varie selon l'espèce et le stade de croissance lors de l'incorporation (Frankenberger et Abdelmagid, 1985) va aussi influencer l'effet des CC sur le COS. La différence entre les taux de décomposition des différentes espèces est principalement due à la variation de la composition chimique des CC (Quemada et Cabrera, 1995). Le rapport C/N et le contenu en lignine des feuilles est généralement plus faible que ceux des tiges et des racines sur un même plant (Cherr et al. 2006). Bien que la biomasse racinaire peut être relativement faible, Puget et Drinkwater (2001) ont montré que le carbone provenant des racines lignifiées peut persister plus longtemps dans le sol en comparaison avec le carbone hautement labile provenant des tiges, démontrant l'importance à long terme de la contribution des racines sur la MOS. Somda et al. (1991) ont aussi démontré que les rapports C/N et lignine/N étaient généralement plus faibles pour les espèces de légumineuses (8-27 et 2-9, respectivement) que pour les non-légumineuses (27-186 et 4-44, respectivement).

Selon Blanco-Canqui et al. (2013), les CC de graminées sont plus efficaces à augmenter les niveaux de COS que les CC de légumineuses dû à la décomposition plus lente des résidus de graminées. Cependant, selon des résultats provenant d'études à long terme sur les amendements organiques, l'utilisation de CC de légumineuses (i.e. du matériel végétal de haute qualité ou labile) a généralement entraîné les plus fortes augmentations de C du sol parmi plusieurs autres pratiques de gestion, malgré les biomasses moins élevées des légumineuses par rapport à celles des céréales (Peters et al., 1997; Grandy et Robertson, 2007). Cette contradiction reflète probablement les deux schémas généraux d'humification proposés par les scientifiques du sol: 1) le modèle de dégradation suppose une préservation sélective de la végétation récalcitrante et de l'humus et la minéralisation des composantes labiles; 2) l'autre modèle propose que les substances, dérivées de la dégradation biologique des résidus végétaux et microbiens, se transforment en polymères formant l'humus (Frimmel et Christman, 1988). Cotrufo et al. (2013) ont proposé une approche de stabilisation de la matrice via l'efficacité microbienne, qui précise que les constituants végétaux labiles sont la principale source de produits microbiens puisqu'ils sont utilisés plus efficacement par les microbes. Ces produits microbiens de décomposition deviendraient ainsi les principaux précurseurs de la MO stable en favorisant l'agrégation avec une forte liaison chimique à la matrice minérale des sols.

Par contre, l'effet du climat sur la croissance et la survie à l'hiver des CC pérennes peut moduler cette conclusion. Deux études effectuées dans deux régions différentes des États-Unis (nord-ouest et sud-est) ont démontré des effets inverses. Kuo et al. (1995) ont rapporté des concentrations de carbone et d'azote dans le sol significativement plus élevées après six ans avec des CC de graminées (seigle et raygrass) alors qu'aucun changement n'a été noté avec les CC de légumineuses (vesce velue et pois autrichien d'hiver). Les cultures de seigle et de raygrass avaient accumulé une biomasse plus élevée à l'automne et une croissance plus rapide au printemps (59 % plus de biomasse) que les CC de légumineuses qui étaient moins bien adaptées à cette région du nord-ouest des États-Unis. Dans l'autre étude conduite dans le sud-est, la vesce velue a produit une biomasse plus élevée que le seigle et le blé et fut plus efficace à augmenter les concentrations de carbone et d'azote dans le sol (Mc Vay et al., 1989).

Une autre étude effectuée en Iowa a comparé les effets du seigle d'automne implanté; 1) après la récolte du maïs-ensilage ou 2) après le soya ou 3) après les deux cultures dans le cadre d'une rotation maïs-ensilage-soya (Moore et al., 2014). Le seigle d'automne était détruit le printemps suivant avant le semis de la culture subséquente. Après neuf ans (4 cycles de rotation), le traitement de seigle d'automne implanté après les deux cultures présentait une augmentation de 15 % de la matière organique du sol (MOS) et de 44 % de la matière organique particulaire en comparaison avec le traitement sans CC et ce, dans la couche de sol 0-5 cm. De façon générale, les traitements ayant du seigle après le maïs-ensilage ou après les deux cultures avaient un effet positif sur les indicateurs de la qualité du sol. Le seigle semé uniquement après le soya n'apportait pas assez de résidus pour occasionner des changements mesurables sur la MOS, la période de croissance après la récolte du soya n'étant pas suffisante en comparaison avec le maïs-ensilage.

Dans le cadre d'une rotation maïs-grain(M)-soya(S) en semis direct (Illinois), Villamil et al. (2006) ont comparé les effets du seigle d'automne (SA) et de la vesce velue (V) selon les combinaisons suivantes : soit 1) le seigle semé après chaque culture (M/SA - S/SA), le seigle semé après le maïs et la vesce semé après le soya (M/SA - S/V) et le seigle semé après le maïs et un mélange seigle/vesce semé après le soya (M/SA - S/SAV). Après quatre ans, les rotations avec la vesce velue (M/SA - S/V et M/SA - S/SAV) ont augmenté significativement la MOS sur le profil de 30 cm en comparaison à la rotation avec le seigle seulement ou sans CC. Bien que le seigle produise souvent une quantité plus élevée de résidus aériens et racinaires avec un rapport C/N plus élevé que la vesce velue (Ranells et Waggar, 1997), les résultats de cette étude suggèrent que sans la contribution d'azote provenant de la vesce velue, les résidus de seigle sont peu ou pas transformés en MOS. Le mélange seigle/vesce a produit un rendement en matière sèche plus élevé que chaque CC en monoculture, soit une moyenne de 0,5 t/ha plus élevée. De plus, le ratio C/N plus faible du seigle en mélange avec la vesce permettrait une décomposition plus rapide en comparaison avec le seigle utilisé seul et une minéralisation moins rapide qu'avec un CC de vesce velue (Vilamil et al. (2006).

Ainsi, les mélanges de différentes espèces de CC peuvent augmenter davantage le C organique du sol en comparaison avec une seule espèce de CC dû à une production souvent plus élevée de biomasse aérienne et racinaire des CC (Fae et al, 2009). En Ohio, Stavi et al. (2012) ont montré qu'un mélange de pois d'hiver autrichien et de radis avaient permis d'obtenir une plus grande concentration de carbone organique dans le sol (19,4 g kg⁻¹) que le pois d'hiver (15,9 g kg⁻¹) ou le radis seul (17,6 g kg⁻¹).

En climat plus nordique, l'effet des CC sur la MOS peut aussi varier d'une étude à l'autre. Dans une rotation orge-soya, Carter et Kunelius (1993) ont comparé les effets du raygrass (italien et Westerwolds) et du trèfle rouge semés en intercalaire avec l'orge sur la qualité du sol après deux cycles de rotation sur un loam sableux à Charlottetown. Le raygrass et le trèfle rouge en intercalaire avec l'orge ont produit une biomasse racinaire de 6 à 11 fois plus élevée en comparaison avec celle de la culture d'orge sans CC. La concentration du carbone organique a été augmentée dans les agrégats de 1-2 mm et de 4,7-9,5 mm avec les CC mais n'a pas varié dans le sol entier. Il n'y a donc pas eu d'augmentation significative du COS.

Dans une autre étude menée au Québec, N'Dayegamiye et Tran (2001) ont évalué les effets de cinq CC (trèfle rouge, sarrasin, millet japonais, moutarde blanche et colza) sur une culture subséquente de blé après deux cycles de rotation (CC-blé). Le trèfle rouge a été implanté au semis avec l'orge et récolté en octobre alors que les autres CC ont été semés en juin (sans culture d'orge) et récoltés en août. Tous les engrais verts ont été incorporés au sol dans la première saison. Après deux cycles de rotation, les CC de moutarde, colza, millet et sarrasin ont augmenté le contenu en carbone du sol entier (0-20 cm) de 19 % à 40 % en comparaison avec le témoin sans CC. Ces CC ont obtenu d'excellents rendements en biomasse aérienne (entre 2 et 11 t/ha) et un rapport C/N qui variait entre 20 et 37, indiquant des contenus en hémicellulose et lignine assez faibles. Dans cette étude, l'effet des CC à court terme peut être expliqué par le fait qu'une quantité de carbone provenant des CC a été protégée temporairement par le contenu élevé en limon et en argile de ce sol (loam limoneux).

3. Le type de sol et le niveau de carbone initial du sol

L'accumulation du carbone dans le sol avec les CC varie selon la classe texturale du sol. La capacité d'un sol à stocker et protéger le carbone est corrélée positivement avec le contenu en argile du sol (Hassink et Whitmore, 1997). Généralement, la matière organique, associée aux plus petites fractions du sol (limon et argile), peut être mieux protégée physiquement et chimiquement de la décomposition que celle associée aux plus larges fractions du sol (sable) (Cherr et al. 2006). Ainsi, la teneur en matière organique dans les sols à texture fine pourrait montrer une réponse plus élevée et plus rapide aux systèmes culturaux avec CC (Cherr et al. 2006). Dans les sols plus sableux, en conditions chaudes et humides, l'augmentation de la MOS peut exiger un apport plus élevé et plus constant de résidus récalcitrants (à la minéralisation), particulièrement en travail conventionnel (Cherr et al., 2006).

Par contre, les sols érodés avec de faibles niveaux initiaux en carbone peuvent avoir une capacité plus élevée à accumuler du carbone avec les CC (Berhe et al., 2007). Les contributions annuelles des résidus de CC peuvent être relativement faibles en comparaison au pool pré-existant de la matière organique du sol (Cherr et al., 2006).

4. Le travail du sol

Les bénéfices des CC sur l'accumulation du COS peuvent être détectables plus rapidement dans un système de semis direct par rapport au système de travail conventionnel, particulièrement dû au fait que le taux de décomposition des résidus est réduit en semis direct (Blanco-Canqui et al., 2015). En général, l'intégration des CC dans les systèmes de semis direct se traduit par une accumulation de COS de 0,1 à 1,0 t C/ha de plus par année en comparaison aux systèmes de semis direct sans CC (Blanco-Canqui et al., 2015). Dans une étude récente en Illinois, Olson et al. (2014) ont précisé que les CC de vesce velue et de seigle séquestraient 0,88 t C/ha/année en semis direct, 0,49 t C/ha/année sous chisel et seulement 0,10 t C/ha/année sous labour en considérant la couche de sol 0-75 cm, et ce, après 12 ans de régie avec CC. Il est souvent reconnu que le semis direct augmente la concentration du COS près de la surface en comparaison aux systèmes de travail conventionnel (Blanco-Canqui et al., 2011). L'implantation de CC à racines profondes peut favoriser l'accumulation du COS dans les couches de sol plus profondes en semis direct (Stavi et al., 2012) mais cet aspect devra être documenté par de futures recherches avec différentes espèces de CC.

5. Le climat

La quantité de précipitations affecte la production de biomasse des CC. Par exemple, en régions semi-arides, le COS peut augmenter avec les CC, mais étant donné la faible production de biomasse due aux précipitations moins élevées, l'accumulation de COS peut se faire sur une plus longue période de temps que dans les régions à fortes précipitations (> 500 mm) (Blanco-Canqui et al., 2015). De la même façon, l'utilisation de l'eau par les CC peut avoir un impact négatif sur la réserve en eau disponible du sol et avoir un impact sur l'approvisionnement en eau et les rendements de la culture subséquente dans les régions semi-arides ou dans les climats à faible précipitation durant l'hiver (Dabney et al., 2001; Thorup-Kristensen et al., 2003). Dans les environnements plus froids, les sols peuvent présenter de grandes quantités de matière organique avec de faibles taux de décomposition, les changements dans la gestion des résidus peuvent donc affecter très lentement la MOS (Franzluebbers et Arshad, 1996). Enfin, des températures de sol plus fraîches sous les résidus de CC peuvent retarder la croissance des cultures subséquentes qui sont limitées par rapport à leur aire d'adaptation. Les CC sont donc mieux adaptés et auront le plus d'impact dans les régions plus chaudes avec des précipitations abondantes (Dabney et al. 2001).

Effets des cultures de couverture sur certaines propriétés physiques et biologiques du sol

Impacts des CC sur l'agrégation du sol et les propriétés biologiques

Selon une revue récente de plusieurs études, les CC semblent améliorer rapidement (< 3 ans) l'agrégation des sols (Blanco-Canqui et al., 2015). Les cultures de couverture augmentent la stabilité des agrégats en protégeant la surface du sol des impacts de la pluie, en fournissant une biomasse racinaire additionnelle et en augmentant la concentration du COS et l'activité microbienne (Blanco-Canqui et al., 2015). La figure 13 illustre les nombreux mécanismes par lesquels les CC peuvent influencer les processus physiques, chimiques et biologiques contribuant à la formation de macro-agrégats stables. Les résidus de CC peuvent générer des agents liants organiques transitoires, temporaires et permanents qui favorisent l'agrégation des sols (Tisdall et Oades, 1982). Selon Hadas et al. (1998), les résidus riches en azote et plus fermentescibles stimulent l'activité de la microflore et la formation rapide d'agrégats de sol, cette action étant cependant de courte durée. Par contre, les résidus organiques ou les CC mûrs ayant des rapports C/N un peu plus élevés seraient utilisés autant comme source d'énergie microbienne, mais aussi pour la production de polysaccharides dans les sols,

favorisant ainsi une plus grande stabilité des agrégats des sols (Hadas et al., 1998). Il est donc possible qu'une incorporation périodique de CC plus mûrs pourrait à la fois augmenter et maintenir la stabilité des agrégats de sol. Toutefois, les CC vont procurer des substrats aux microorganismes du sol non seulement au moment de leur incorporation mais aussi durant leur période de croissance, via les exsudats racinaires, ou via le remplacement des racines et la symbiose avec les mycorhizes (Thorup-Kristensen et al., 2003). Il ressort que l'effet des CC sur les activités biologiques et enzymatiques et sur la formation d'agrégats stables à l'eau peut dépendre fortement des espèces de CC, de leur degré de maturité ainsi que de leur composition chimique (Abdallahi et N'Dayegamiye, 2000; N'Dayegamiye et Tran, 2002).

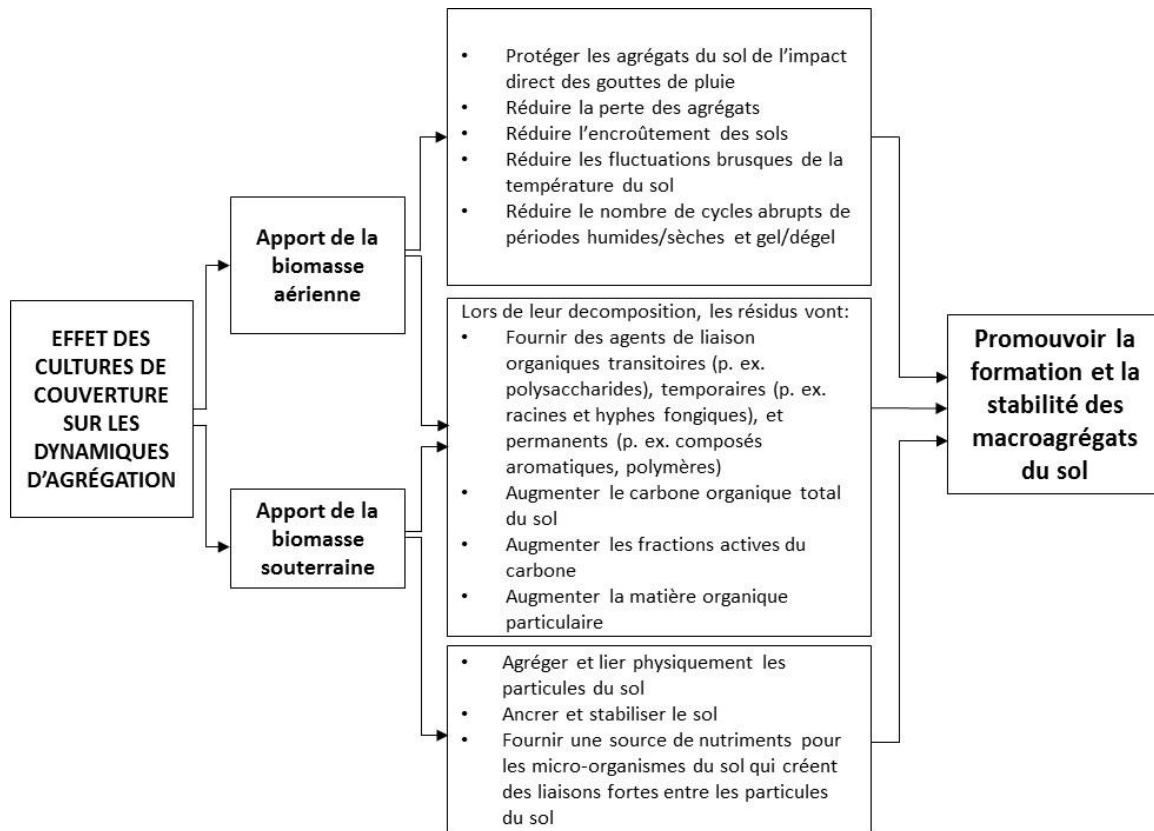


Figure 13. Mécanismes par lesquels les cultures de couverture influencent les processus biologiques, chimiques et physiques du sol contribuant à la formation de macroagrégats stables. (Blanco-Canqui et al., 2015).

Parmi les travaux recensés par Blanco-Canqui et al. (2015), 7 études sur 11 ont montré que les CC augmentent la stabilité à l'eau des agrégats de sol alors que les 4 autres études n'ont trouvé aucun effet. Les agrégats stables à l'eau provenant d'un système avec CC sont 1,2 à 2,0 fois plus larges que les agrégats prélevés dans les systèmes sans CC (Blanco-Canqui et al., 2015). Il est à noter que la plupart de ces études ont été menées dans des régions avec plus de 500 mm de précipitations annuelles. Les CC combinées au système de semis direct peuvent améliorer davantage les propriétés physiques de sol que les CC implantées dans un système conventionnel. Le travail du sol perturbe l'agrégation du sol et accélère la minéralisation du COS et peut ainsi réduire les bénéfices des CC en comparaison aux systèmes de travail réduit du sol ou de semis direct (Blanco-Canqui et al., 2015). Les bénéfices des CC peuvent aussi varier selon la classe texturale de sol. Mc Vay et al. (1989) ont mis en évidence que les CC de trèfle incarnat et de vesce velue établis depuis 3 ans avaient augmenté la stabilité à l'eau des agrégats sur un loam sablo-argileux mais pas sur un loam argileux.

La section suivante présente les résultats des études de l'est du Canada, des États-Unis et de climat plus nordique comme la Norvège en tentant de regrouper les études en fonction des espèces étudiées. Toutefois, la première étude comportait des espèces de CC appartenant à plusieurs familles.

Dans une étude menée au Québec, Abdallahi et N'Dayegamiye (2000) ont évalué les effets de 2 incorporations (1993 et 1995) de 5 CC (trèfle rouge, sarrasin, millet japonais, moutarde blanche et colza) sur

les propriétés physiques et biologiques d'un loam limoneux. À l'exception du colza, le diamètre moyen pondéré (DMP) des agrégats ainsi que la proportion d'agrégats > 0,25 mm ont été significativement accrus par l'apport des CC. Les proportions de macro-agrégats variaient entre 55 et 57 % pour le millet japonais et le trèfle, entre 58 et 64 % pour la moutarde blanche et le sarrasin et étaient plus faibles pour le témoin sans CC et le colza (49 et 47 %). L'incorporation du trèfle, du sarrasin et de la moutarde blanche a augmenté significativement la biomasse microbienne, comparativement au millet japonais, au colza et au témoin sans CC. Les apports de CC ont aussi accru les activités de la phosphatase alcaline (de 40 à 80 %) et de l'uréase dans le sol comparativement au témoin sans CC mais n'ont pas eu d'effet significatif sur l'activité de la phosphatase acide, ce qui est un peu surprenant, puisque cette enzyme provient principalement des tissus végétaux (Abdallahi et N'Dayegamiye, 2000).

1. Études sur les légumineuses

Dans une étude québécoise plus récente, N'Dayegamiye et al. (2015) ont mesuré les effets de 13 traitements de CC, soit 6 légumineuses établies en monoculture (haricot, soya, pois sec, vesce velue, luzerne, trèfle incarnat), 3 légumineuses en association avec le blé (vesce velue/blé, trèfle incarnat/blé, pois fourrager/blé), 3 légumineuses en intercalaire dans le maïs (luzerne/maïs, vesce velue/maïs, trèfle incarnat/maïs) et un témoin (culture de maïs sans CC). Ces CC, implantées sur un loam argileux à deux sites contrastants pour le climat (St-Lambert (plus nordique) et Beloeil (plus chaud)), ont été suivies par une culture de blé ou de maïs. Les CC ont eu un effet positif sur les propriétés physiques et biologiques du sol seulement au site plus chaud de Beloeil. Les CC de vesce velue, de luzerne, de trèfle incarnat et de vesce velue/blé ont augmenté le diamètre moyen pondéré des agrégats (de 9 à 13 %) et la proportion des agrégats > 5 mm (de 28 à 39 %) en comparaison avec le témoin. Elles ont aussi augmenté l'activité microbienne mesurée par la phosphatase alcaline et la déshydrogénase. Ces CC étaient caractérisés par un faible rapport C/N (entre 14 et 26) et probablement par une large proportion de fractions labiles (cellulose, hémicellulose) qui ont pu promouvoir une croissance rapide des microorganismes et induire l'agrégation du sol (N'Dayegamiye et al., 2015). Les CC protéagineuses (haricot, soya et pois) et les CC implantées en intercalaire dans le maïs n'ont pas eu d'effets, compte tenu de leur faible biomasse retournée au sol. En comparaison avec le site plus nordique, le site bénéficiant d'un climat plus chaud a probablement stimulé davantage la minéralisation des résidus de CC de légumineuses et améliorer la production d'agents liants organiques tels que les polysaccharides, mucilages bactériens et hyphes fongiques (N'Dayegamiye et al., 2015).

Latif et al. (1992) ont mesuré les effets d'une CC intercalaire de légumineuses (mélange de luzerne, trèfle et vesce velue implanté au semis du maïs) sur les propriétés physiques du sol à deux sites (argile Ste-Rosalie et argile limoneuse Ormstown) pendant 3 saisons. Le pourcentage des agrégats stables et le diamètre moyen pondéré des agrégats ont augmenté significativement avec le mélange de CC à chaque échantillonnage effectué à l'automne sur le sol Ste-Rosalie (pendant 3 ans) mais à un seul automne sur le sol d'Ormstown. Comme l'échantillonnage était fait en septembre, les effets mesurés sont principalement associés à la croissance racinaire et à la production d'exudats racinaires pendant la saison. Ces effets ont cependant peu de persistance car les mesures effectuées au printemps suivant (après un labour automnal des CC) n'ont révélé aucune différence significative avec le témoin. Les effets positifs des CC intercalaires sur la qualité du sol se sont donc fait sentir sur la saison en cours et ont eu un effet transitoire et non cumulatif dans le cas de ce système avec travail du sol (Latif et al., 1992).

2. Études sur les graminées (seigle et raygrass) en comparaison aux légumineuses (vesce et trèfle)

Dans le cadre d'une rotation maïs-grain(M)-soya(S) implantée en semis direct sur un loam limoneux (Illinois), Villamil et al. (2006) ont comparé les effets du seigle d'automne (SA) et de la vesce velue (V) selon les combinaisons suivantes : soit 1) le seigle semé après chaque culture (M/SA - S/SA), le seigle semé après le maïs et la vesce semé après le soya (M/SA - S/V) et le seigle semé après le maïs et un mélange seigle/vesce semé après le soya (M/SA - S/SAV). Les CC ont persisté durant l'hiver et ont été détruites au printemps avant le semis de l'autre culture. Après 4 ans, toutes les combinaisons avec ces CC en semis direct ont eu un effet positif sur la stabilité des agrégats à l'eau avec une augmentation de 9, 13 et 17% pour les systèmes respectifs de M/SA - S/SA, M/SA - S/V et M/SA - S/SAV. L'augmentation de la MOS dans les systèmes avec la vesce velue explique cet effet positif sur la stabilité des agrégats. Dans le cas du système avec le seigle seulement, il est possible que l'augmentation de la stabilité des agrégats soit liée à une biomasse racinaire plus élevée du seigle (Villamil et al., 2006).

Dans le cadre d'une rotation maïs-soya-blé d'automne (Ontario), Ball-Coelho et al. (2000) ont vérifié les effets d'un semis de seigle d'automne réalisé en intercalaire dans le maïs sur l'agrégation d'un sol sableux. La CC de seigle a eu peu d'effet sur la répartition des agrégats et leur stabilité à l'eau. Dans les sols loameux et argileux, les macro-agrégats peuvent être stabilisés par les fractions labiles de carbone (Angers, 1998) alors

que dans les sols sableux, ce phénomène est peu ou pas apparent (Degens, 1997).

D'autres essais ont vérifié les effets du raygrass et du trèfle sur la structure du sol. Dans une étude réalisée en Norvège, Breland (1995) a comparé les biomasses racinaires de CC de raygrass italien et de trèfle blanc implantés en intercalaire avec le blé de printemps et leurs effets sur la confection des sillons de labour à l'automne et sur l'agrégation des sols au printemps suivant. La masse racinaire du trèfle blanc et du raygrass a été estimée à 952 et 3050 kg/ha respectivement. En comparaison avec le témoin (culture de blé sans CC), les sillons de labour issus des parcelles avec raygrass sont demeurés presque inchangés au printemps suivant, résultant de l'enchevêtrement visible des racines denses et fines. Les sillons de labour issus des parcelles avec trèfle étaient légèrement plus profilés que ceux effectués sur le retour de blé sans CC, le système racinaire du trèfle étant moins extensif que celui du raygrass. La stabilité des agrégats de la fraction 0,6-2,0 mm tendait à être plus élevée avec le raygrass en comparaison avec le témoin. Cette tendance avec le trèfle blanc était similaire mais un peu plus faible. La stabilité des agrégats de la fraction 2-6 mm fut peu affectée par les CC. Il semble que l'effet clairement visible du raygrass sur les sillons de labour ne se soit pas traduit par un effet prononcé sur la stabilité des agrégats (Breland, 1995).

Dans une rotation orge-soya, Carter et Kunelius (1993) ont comparé les effets du raygrass (italien et Westerswolds) et du trèfle rouge semés en intercalaire avec l'orge sur la qualité du sol après deux cycles de rotation sur un loam sableux à Charlottetown. Bien que la concentration du carbone organique ait été augmentée dans les agrégats de 1-2 mm et de 4,7-9,5 mm avec les CC, la stabilité à l'eau des agrégats des deux classes ne différait pas du témoin sans CC. La période temporaire de croissance des CC combinée à l'utilisation du labour pour l'incorporation des CC empêche probablement une amélioration permanente de la macro-agrégation (Carter et Kunelius, 1993). Par contre, la micro-agrégation, mesurée par le test de dispersion, a montré que le pourcentage d'agrégats de 1-2 mm était supérieur (46-47 %) avec deux types de raygrass (italien et Westerswolds) par rapport au témoin sans CC (37 %), le CC de trèfle rouge ayant un comportement intermédiaire. Quelques études ont rapporté une augmentation de la stabilité des agrégats avec le raygrass annuel ou d'autres graminées en comparaison au trèfle rouge ou d'autres légumineuses et dicotylédones (Stone et Buttery, 1989; Perfect et al., 1990a, 1990b). Toutefois, le trèfle rouge peut être efficace dans les climats frais à augmenter la biomasse microbienne et à améliorer la structure des sols à texture fine (Drury et al., 1991) et accélérer la décomposition des résidus de culture en surface (Drury et al., 1999). Dans le cadre d'une rotation blé d'automne-maïs-soya avec ou sans trèfle dans le blé d'automne et comparant trois travaux de sol (labour, travail en bandes et semis direct), Drury et al. (2003) ont montré, 3 années sur 4, que les systèmes de travail en bandes et de semis direct combinés avec le trèfle rouge présentaient une stabilité des agrégats à l'eau supérieure à celle du système conventionnel avec et sans trèfle rouge.

En Ontario, une autre étude a permis de comparer les effets du trèfle rouge, du raygrass annuel, et du radis huileux sur la stabilité des agrégats tout au long de la saison suivant l'implantation des CC (Dapaah et Vyn, 1998). Les CC de trèfle rouge et de raygrass ont été semés en intercalaire dans du blé d'automne ou dans de l'orge de printemps alors que le radis huileux a été semé après la récolte de ces deux céréales. Les CC ont été incorporés seulement au printemps suivant. La stabilité des agrégats à l'eau était plus élevée au mois de mai (avant l'incorporation des CC) dans les parcelles avec radis huileux en comparaison avec les autres CC et le témoin sans CC. Il est possible que la combinaison des racines profondes et fibreuses du radis avec la décomposition hâtive (dû au gel) de la forte biomasse aérienne (2,40 à 3,68 t/ha) ait résulté en un enrichissement à court terme d'agents liants conférant une stabilité supérieure aux agrégats au début du printemps pour ce traitement (Dapaah et Vyn, 1998). Par contre, après l'incorporation des CC, la stabilité des agrégats dans les parcelles avec raygrass annuel (biomasse de 1,28 à 2,53 t/ha) et avec trèfle rouge (biomasse de 2,49 à 3,53 t/ha) a augmenté de mai à septembre. La stabilité des agrégats avec le raygrass était significativement supérieure en juin et septembre/octobre par rapport aux autres traitements. Il est possible que des agents liants persistants et une moins grande fracturation des agrégats aient conduit à cette plus grande stabilité avec le raygrass annuel (Dapaah et Vyn, 1998). Il ressort de cette étude qu'une dynamique importante se fait en cours de saison, cette dynamique étant liée à la décomposition et minéralisation des différentes espèces de CC qui interagissent avec les propriétés biologiques et physiques du sol.

3. Études sur le pois fourrager

D'autres travaux de recherche ont porté sur l'étude du pois fourrager et son effet sur les propriétés chimiques et biologiques du sol. Piotrowska et Wilczewski (2012) ont évalué l'impact du pois fourrager et du radis huileux sur l'activité biologique du sol pendant trois saisons consécutives. Les CC étaient semés au début d'août après une culture d'orge et labourés trois mois après. Une culture de blé de printemps était semée l'année subséquente et les mesures étaient prises avant le semis et après la récolte de blé afin de mesurer les effets durant l'année suivant les CC. Une activité biologique plus élevée (mesurée par différentes activités

enzymatiques) a été obtenue dans les traitements avec CC en comparaison au témoin sans CC, certaines activités enzymatiques étant supérieures avec le pois fourrager en comparaison avec le radis huileux. Cet avantage pour le pois fourrager peut s'expliquer par l'influence de la fixation symbiotique de cette légumineuse sur l'activité enzymatique et aussi par la biomasse plus élevée du pois fourrager mesurée à chaque année en comparaison avec le radis huileux. De façon générale, l'activité biologique était plus intense en août (après la récolte) qu'en mars-avril (avant le semis), cette période étant caractérisée par une température plus fraîche (Piotrowska et Wilczewski, 2012).

Deux autres essais ont permis de préciser les impacts du pois fourrager sur l'activité biologique en faisant varier les moments et outils d'incorporation de cette CC mais sur deux types de sol contrastés. Dans une première étude, effectuée sur un loam très fertile, une incorporation d'automne (avec labour) a été comparée à une incorporation de printemps (avec un outil à disque); les mesures d'activités enzymatiques ayant été mesurées avant le semis, en saison et après la récolte d'orge subséquente à la CC de pois fourrager (Wilczewski et al., 2014). Les résultats confirment que l'activité biologique a été plus élevée avec le pois fourrager en comparaison au témoin sans CC, et ce, avec les deux moments d'incorporation. Cette activité biologique peut s'expliquer par la stimulation de l'activité enzymatique suite à l'incorporation de la biomasse du pois fourrager conjugué à la quantité d'azote minéral fournie par la CC avant le semis. Ces quantités d'azote mesurées au printemps étaient significativement plus élevées pour l'incorporation d'automne (40,1 mg/kg) et de printemps (33,1 mg/kg), que celles mesurés dans le témoin sans CC (22,9 mg/kg).

Dans la deuxième étude, effectuée sur un loam sableux avec les mêmes traitements (incorporation d'automne et de printemps du pois fourrager), Wilczewski et al. (2015) ont trouvé que l'activité biologique était plus élevée dans les parcelles avec CC en comparaison avec le témoin mais que cette activité était accentuée significativement dans les parcelles où le pois fourrager avait été laissé intact sur le sol (effet de pailis) et incorporé seulement avant le semis. Cet effet était lié à l'amélioration de la teneur en eau (dans la couche 5-15 cm) et au contenu en azote plus élevé mesuré dans ce traitement qui a pu augmenter les populations de micro-organismes du sol et conséquemment l'activité enzymatique (Wilczewski et al., 2015). Ces résultats mettent en évidence les différentes dynamiques qui peuvent résulter de la gestion des CC en lien avec les méthodes d'incorporation et les types de sol.

Impacts des CC sur la compaction du sol

La compaction des sols est de plus en plus préoccupante avec l'augmentation de la taille et du poids des machineries agricoles. En utilisant l'eau et en maintenant la structure du sol, les CC améliorent la capacité portante du sol face aux machineries agricoles et facilitent l'accessibilité au champ (Känkänen et al., 1998). Toutefois, selon le type de sol et la gestion des cultures, les CC peuvent avoir un impact beaucoup moins important sur la porosité du sol et la conductivité hydraulique que peut en avoir le trafic des machineries agricoles (Wagger et Denton, 1989). Il faut donc garder en tête les principes de base de limiter le poids des machineries particulièrement en conditions humides pour éviter la compaction en surface et en profondeur.

Les bénéfices apportés par les CC en regard de la compaction vont varier selon les espèces, la durée de croissance des CC et la quantité et la qualité des biomasses racinaires de ces CC (Chen et Weil, 2010). Les CC à racines pivotantes et profondes telles que le radis peuvent pénétrer plus facilement à travers les couches de sol plus compactes. Les racines pivotantes ont un potentiel de pénétration plus élevé que les racines fibreuses puisque ces dernières sont souvent concentrées près de la surface du sol (Cresswell et Kirkegaard, 1995). De plus, après la dessiccation des racines pivotantes, ces CC laissent de larges canaux ou macropores qui permettent d'améliorer la circulation de l'eau et de l'air dans les couches plus profondes (Chen et Weil, 2010). Dans une étude effectuée au Maryland sur différents types de sol (loam à sable loameux), Chen et Weil (2010) ont mesuré le nombre de racines des CC de radis fourrager (RF), de colza (C) et de seigle (S) qui pénétraient le sol selon trois niveaux de compaction (élevé, moyen et sans compaction). Le comportement des CC a été le même dans la couche de sol 0-8 cm située avant la zone de compaction (8-15 cm). Le ratio de la biomasse racinaire dans la couche non compactée/biomasse racinaire dans la couche compactée était 5 fois plus élevé avec une compaction élevée vs sans compaction. L'effet de la compaction sur la biomasse racinaire était dû à un épaississement des racines primaires et une prolifération des branches ou racines latérales juste au-dessus de la couche plus dense. Le classement des CC selon le nombre de racines ayant pénétré à une profondeur de 15-50 cm sous une compaction élevée était : RF > C > S. C'est donc le radis fourrager qui fut le moins affecté par la compaction alors que les racines de seigle ont été les plus inhibées par la compaction, en particulier lorsque le contenu en argile du sol était relativement élevé et qu'il n'y avait pas d'anciens canaux de racines disponibles. Ces résultats confirment que les espèces possédant des diamètres racinaires élevés ont une densité racinaire supérieure en sols compactés en comparaison aux espèces avec des diamètres racinaires plus petits. Par contre, sans compaction, il existe peu de différence entre les espèces de CC quant à la pénétration verticale des racines (Chen et Weil, 2010).

Une étude plus récente effectuée en Illinois par Acuna et Villamil (2014) a comparé le comportement du radis fourrager seul ou en mélange avec le seigle, le triticale, le sarrasin ou la vesce velue face à deux niveaux de compaction (effectués par deux types de machinerie). En se basant sur les mesures de densité du sol et de résistance à la pénétration, la compaction imposée artificiellement avait complètement été atténuée après la saison d'hiver et ce, avec ou sans CC. Les auteurs expliquent cette situation par la présence d'un contenu élevé en argile gonflante qui aurait pu, avec les cycles d'humidification et de séchage combiné au contenu élevé en matière organique et aux résidus de la culture précédente de blé, jouer un rôle significatif dans la résilience élevée de ce sol aux traitements de compaction.

Impacts des CC sur les propriétés hydrauliques et l'érosion hydrique

Les CC influencent les propriétés physiques du sol en lien avec le transport de l'eau. Leurs effets peuvent être divisés selon leur impact sur : (1) l'infiltration de l'eau, en protégeant le sol de surface et en améliorant les propriétés du sol (MOS, agrégation, stabilité des agrégats) et (2) la conductivité hydraulique, en augmentant la macroporosité et la connectivité des pores (Sainju et Singh, 1997; Thorup-Kristensen et al., 2003; Blanco-Canqui et al., 2015). Les CC interceptent l'énergie cinétique de la pluie qui perturbe les agrégats à la surface du sol, réduisant ainsi les effets des précipitations élevées sur le croûtage ou la battance des sols (Dabney et al., 2001; Folorunso et al., 1992). L'augmentation de l'infiltration de l'eau sous CC peut accroître la capture des précipitations et l'entreposage de l'eau (Blanco-Canqui et al., 2015). Les CC peuvent aussi réduire l'évaporation de l'eau due à l'effet de paillis (Smith et al., 1987). En résumé, les CC augmentent donc fréquemment l'infiltration de l'eau dans le sol dû aux effets directs du couvert de résidus ou des changements apportés par les CC à l'agrégation et la formation de macropores par les racines (Reeves, 1994). L'augmentation de la porosité du sol due à l'action des racines, spécialement en conditions de travail réduit du sol, est citée fréquemment comme la cause expliquant la meilleure infiltration de l'eau dans le sol (Reeves, 1994). Les CC à racines profondes, telles que le lupin, peuvent être particulièrement efficaces à augmenter la profondeur d'enracinement effective et la capacité d'entreposage de l'eau du sous-sol (Reeves, 1994).

En se basant sur 4 études effectuées aux États-Unis, Blanco-Canqui et al. (2015) rapportent que l'infiltration de l'eau peut être augmentée avec les CC de 1,1 à 2,7 fois par rapport à un système sans CC. Les effets sur d'autres propriétés hydrauliques ne sont souvent pas mesurables dans les 5 premières années. En Caroline du Nord, la vesce velue et le blé d'automne implantés dans un système en semis direct avec le maïs n'a pas eu d'effet sur la conductivité hydraulique saturée d'un loam sableux après 3 ans (Wagger et Denton, 1989). Toutefois, à long terme, les CC peuvent améliorer les propriétés hydrauliques d'un sol. Après 17 ans de régie avec CC sur des sols loameux en Arkansas, le seigle d'automne, la vesce velue et le trèfle incarnat ont augmenté la porosité du sol, la conductivité hydraulique saturée et la capacité de rétention en eau (Keisling et al. 1994). Une étude réalisée en Iowa pendant treize ans (2008-2014) a permis de vérifier la capacité d'entreposage de l'eau d'une rotation maïs-soya avec une CC de seigle d'automne implantée à chaque année après ou peu de temps avant la récolte (Basche et al., 2016). La période de l'étude incluait les 3 années détenant des records de précipitations (2008, 2010, 2014) et de sécheresse (2012, 2013). La CC a augmenté significativement la capacité d'entreposage de l'eau sur une profondeur de 0-30 cm entre 2012 et 2014 en comparaison avec la rotation sans CC et dans la plupart des années, le contenu du sol en eau était augmenté durant la saison de croissance des cultures. La CC a augmenté le contenu en eau à capacité au champ de 10-11 % et la disponibilité en eau pour les cultures de 21-22 %. La croissance des cultures, le prélèvement en azote et les rendements des cultures n'étaient pas différents entre les systèmes (avec ou sans CC).

Bien que les bénéfices des CC à réduire l'érosion hydrique soient généralement reconnus, il y a peu d'études qui ont mesuré le ruissellement de surface et les pertes de sédiments. Blanco-Canqui et al. (2015) rapportent que la réduction du ruissellement avec les CC peut varier entre 13 et 78 % alors que la réduction de pertes de sédiments varie entre 39 et 96 % selon les études. L'efficacité à réduire l'érosion hydrique dépend de l'espèce de la CC et de la couverture du sol par la biomasse de la CC. Le fait d'utiliser un mélange de différentes espèces de CC (ex : graminées et légumineuses) peut assurer une meilleure couverture de la canopée, un rendement plus élevé en biomasse et une couverture plus uniforme de la surface qu'une espèce de CC utilisée seule (Wortman et al., 2012).

Effets des cultures de couverture sur le lessivage de l'azote

La plupart des pertes de nutriments par érosion ou par lessivage se produit dans la période qui se situe entre la récolte et le semis de la culture suivante. La présence d'une CC durant cette période, particulièrement au printemps lorsque les cultures ne peuvent prélever de nutriments et que les risques de précipitations sont élevés, permet de réduire les pertes de nutriments (Blanco-Canqui et al., 2015). Selon une méta-analyse

effectuée par Tonitto et al. (2006), les CC non-légumineuses peuvent prélever entre 20 et 60 unités d'azote en post-récolte et les CC qui persistent durant l'hiver peuvent réduire le lessivage de l'azote entre 40 et 70 % par rapport à un sol nu.

Les CC de graminées et de crucifères sont plus efficaces que les légumineuses pour absorber et immobiliser l'azote (Dabney et al., 2001). Les crucifères sont particulièrement efficaces à prélever l'azote comparativement à d'autres espèces de CC (Kristensen et Thorup-Kristensen, 2004), elles sont donc souvent ensemencées après l'application d'effluents d'élevage, de façon à réduire les risques de pollution et recycler les éléments nutritifs pour la culture subséquente.

Dans une étude menée au nord de la France, Constantin et al. (2010) ont vérifié les effets des CC, du semis direct et de la réduction de fertilisation azotée sur le devenir de l'azote dans le sol et dans l'eau à 3 sites différents pendant 13 à 17 années. Les CC de moutarde blanche, de raygrass italien, de radis ou de céréales d'automne (choisies selon le site et les rotations) étaient ensemencées à chaque année ou aux deux ans selon les sites, vers la fin août ou début septembre, après les cultures de blé d'automne, d'orge de printemps, de pois sec, de maïs-ensilage ou de betterave sucrière. La biomasse moyenne produite par les CC a varié de 1,10 t m.s./ha à 2,32 t m.s./ha selon les sites et était détruite en novembre à 2 sites et en février à 1 site. Les CC ont eu un effet très significatif sur la réduction du contenu en nitrates dans le sol à la fin de l'automne, soit une réduction moyenne de 50 % par rapport au sol nu sans CC (Tableau 31). Parmi les trois pratiques évaluées (CC, semis direct, fertilisation réduite), ce sont les CC qui ont été les plus efficaces à réduire le lessivage de l'azote (entre 36 et 62 %). Les CC ont conduit à une réduction moyenne de 9, 32 et 18 kg N/ha/an selon les sites (Tableau 31). Le traitement de semis direct fut moins efficace à réduire le lessivage, avec une diminution de 6 kg N/ha/an par rapport au système conventionnel. Enfin, la réduction de la fertilisation azotée en-dessous des doses recommandées a eu un faible impact (mais significatif) avec une réduction de 3 kg N/ha/an sur une période de 13 ans. Enfin, les CC ont réduit la concentration en nitrates dans l'eau de 34 à 52 % selon les sites. Parmi les trois pratiques évaluées, seules les CC ont permis de diminuer la concentration en nitrates dans l'eau de drainage sous le seuil européen de 50 mg NO₃/L dans la plupart des cas (Tableau 31).

Tableau 31. Valeurs moyennes annuelles du contenu en nitrates dans le sol (fin automne), de la quantité d'azote lessivé et de la concentration en nitrates dans l'eau de drainage mesurées à trois sites en France.

Site		N-NO ₃ (kg/ha)	N lessivé (kg/ha/an)	NO ₃ (mg/L)
Boigneville (CV)	Avec CC	34	18	57
	Sans CC	68	29	90
Boigneville (SD)	Avec CC	25	14	43
	Sans CC	51	21	65
Bretagne	Avec CC	30	39	31
	Sans CC	49	71	53
Thibie	Avec CC	40	13	46
	Sans CC	70	31	95

Légende : CV= conventionnel, SD= semis direct

Dans les régions nordiques, les conditions climatiques peuvent être limitantes pour l'établissement et la croissance de cultures de couverture après la récolte de la culture principale. Le semis de CC intercalaire dans la culture principale peut alors constituer une avenue intéressante. À l'aide d'une méta-analyse effectuée sur 35 études menées dans les pays Scandinaves, Valkama et al. (2015) ont comparé les effets des CC légumineuses et non-légumineuses semées avec les céréales de printemps sur les pertes d'azote par lessivage. Les deux espèces de légumineuses à l'étude étaient le trèfle rouge et le trèfle blanc alors que les CC non légumineuses étaient le raygrass italien, le raygrass vivace, le raygrass Westerwolds et le colza. En comparaison au témoin sans CC, les CC non-légumineuses ont réduit le lessivage de l'azote de 50 % et le contenu en nitrates du sol de 35 % à l'automne. Le raygrass italien a réduit le contenu en azote du sol plus efficacement (de 60 %) que le raygrass vivace ou que le raygrass Esterwolds (réduction moyenne de 25 %). Les CC légumineuses n'ont pas diminué le risque de lessivage de l'azote. Cependant, les CC non-légumineuses ont réduit le rendement en grains de 3 % avec aucun changement sur la teneur en protéines alors que les CC légumineuses ont augmenté le rendement et la teneur en protéines du grain des céréales de

6 % (Valkama et al., 2015). Les résultats de cette étude ont été confirmés par une autre méta-analyse faite sur des systèmes avec irrigation qui démontre que de remplacer une jachère d'hiver par une CC non-légumineuse (graminées ou colza) permet de réduire de 50 % le lessivage des nitrates alors que l'utilisation de CC légumineuses (trèfles ou vesces) n'a pas d'effet sur le lessivage (Quemada et al., 2013).

L'efficacité des CC à réduire le lessivage de l'azote peut dépendre de plusieurs facteurs mais selon Teixeira et al. (2016), c'est la date de semis et la période de croissance disponible pour la CC qui demeure le facteur qui contribue le plus à la variabilité observée dans l'efficacité des CC à réduire le lessivage, suivi par les conditions climatiques et la capacité de rétention en eau du champ.

Un autre facteur important à considérer est la différence qui peut exister entre les espèces de CC, quant à leur développement racinaire et leur efficacité à diminuer le « pool » de nitrates dans le sol. Une étude effectuée par Thorup-Kristensen (2001) a permis de comparer le système racinaire de plusieurs espèces de CC (seigle d'automne, raygrass italien, avoine, phacélie, vesce velue, seigle/vesce velue, colza d'hiver et radis fourrager) ensemencées à la fin juillet-début août après une culture de pois vert. La biomasse aérienne produite par les CC a varié entre 2,5 et 5,0 t m.s./ha, le seigle ayant obtenu la plus faible biomasse alors que le radis fourrager a remporté le meilleur rendement et ce, pour des contenus en azote qui ont varié entre 100 kg N/ha (seigle) à 160 kg N/ha (radis fourrager). Le développement du système racinaire a été suivi 4 fois dans la saison jusqu'à la mi-novembre. Lors des 2 premières dates d'observation (3 et 4 semaines après le semis), ce sont les céréales et le radis fourrager qui démontraient une intensité racinaire (nombre d'intersections/mètre linéaire) et une profondeur racinaire plus élevées. Cependant, à la dernière mesure (en novembre), c'est le radis fourrager qui a démontré une intensité racinaire et une profondeur d'enracinement plus élevées. Le colza d'hiver et la phacélie ont aussi démontré une croissance racinaire très élevée à partir de la 6^{ème} semaine jusqu'en novembre (similaire au radis fourrager), leurs systèmes racinaires étant plus profond et plus fréquent (% de fréquence et intensité racinaire) que celui du seigle ou de l'avoine. Le seigle, le raygrass et l'avoine ont démontré clairement une diminution de l'intensité racinaire avec la profondeur, menant à de faibles intensités dans les couches de sol plus profondes alors que les crucifères et la phacélie ont montré une intensité racinaire élevée jusqu'à une profondeur de 50 cm et plus. Dans les parcelles sans CC, 129 kg N/ha ont été mesurés dans la couche de surface de 1 m de sol alors que les CC non-légumineuses ont réduit ces quantités à des valeurs de 8 (colza) à 31 kg N/ha (avoine), la vesce velue laissant 51 kg N/ha. De faibles corrélations ont été établies entre les biomasses aériennes et les paramètres racinaires avec les quantités de nitrates résiduelles mesurées dans la couche 0-0,5 m de sol alors que les quantités de nitrates mesurées dans la couche 0,5-1,0 m étaient corrélées à plusieurs paramètres racinaires.

Conclusion

Les cultures de couverture ont des effets bénéfiques sur la qualité des sols. Elles peuvent augmenter la matière organique du sol à long terme mais cet effet est lié à plusieurs facteurs tels que le nombre d'années avec CC, la biomasse aérienne et racinaire des CC, le type de sol, le travail du sol et le climat. Les cultures de couverture augmentent l'activité biologique du sol et semblent améliorer rapidement (< 3 ans) l'agrégation du sol. Elles peuvent aussi augmenter l'infiltration de l'eau et réduire l'érosion hydrique et le ruissellement de surface des sédiments. Enfin, les CC de graminées et de crucifères peuvent réduire la teneur en azote résiduel du sol à l'automne et réduire le lessivage de l'azote vers les cours d'eau. Tous ces bénéfices se traduisent par de multiples services dans l'écosystème agricole. Dans un contexte de développement durable, cette pratique culturale mériterait d'être adoptée à plus grande échelle par les producteurs, particulièrement dans les bassins versants agricoles où la pollution diffuse est importante.

Annexe A. Liste des variables et des facteurs explicatifs entrés dans la base de données

	ÉNTÊTE	DÉTAILS
ÉTUDE	Nom des auteurs/collaborateurs	
	Année du début de l'expérience	
	Durée de l'expérience	Du semis de la CC à la récolte de la culture principale à l'année suivante
FACTEURS PÉDO-CLIMATIQUES	LOCALISATION	
	Ville	Localisation des parcelles expérimentales
	Pays	
	Latitude	Coordonnées décimales
	Longitude	Coordonnées décimales
	Précipitations et gestion de l'eau	
	PABR, mm	Précipitations abondantes et bien réparties adaptée de Tremblay et al. (2012) PABR = [Précipitations totales (pluie, neige) X Shannon Index] + Irrigation
	- PABR total, mm	PABR calculé du semis de la CC à la récolte de la culture principale à l'année suivante
	- PABR année 1, mm	PABR calculé du semis à la récolte de la CC
	- PABR année 2, mm	PABR calculé du semis de la à la récolte de la de la culture principale à l'année suivante
Irrigation	Annual amount of water added with irrigation if available	
Température de l'air		
Minimum	Minimum annuel	
Maximum	Maximum annuel	
Normale des 30 ans		
Propriétés du sol		
Série du sol		
Texture du sol	Grossière, moyenne, fine selon le guide du CRAAQ (CRAAQ, 2010)	
Matière organique du sol	% (0-10 cm)	
FACTEURS AGRONOMIQUES	SYSTÈME CULTURAL	
	Type de système cultural	Organique / Conventionnel
	Type de labour	Semis direct, travail réduit, conventionnel
	Culture précédente	
	Antécédent CC	Nombre d'années précédentes avec utilisation de CC sur les parcelles étudiées
	Culture principale à l'année 2	
	Type de culture	Maïs, céréales, soja
	Date de semis	
	Taux de semis	
	Date de récolte	
	Culture de couverture (CC)	
	Type de système	Intercalaire, dérobée, pleine saison
	Type de CC	Légumineuses, Mélanges (Légumineuses et non légumineuses), Graminées, Autres non légumineuses
	Espèces	Nom latin
	Pérennité	Pérenne vs. annuelle
	Date de semis	
	Taux de semis	
	Date de terminaison	Peut précéder la date d'incorporation
	Méthode de terminaison	Labour, coupe, herbicide, hiver, etc.
	Date d'incorporation	Si incorporée
Méthode d'incorporation	Si incorporée	
Profondeur d'incorporation	Si incorporée, cm	
Opération de travail du sol	Nombre de passages liés à l'incorporation ou la terminaison de la CC seulement	

ENTÊTE (Suite)	
FERTILISATION	Fertilization of cash crop
	Nitrogen application rate
	Type of fertilization
	Number of split N application
	Fertilization of cover crop
	Nitrogen application rate
Type of fertilization	
Number of split N application	
CHAMP	DISPOSITIF EXPERIMENTAL
	Type de dispositif (split-plot, carré latin, etc.)
	Nombre répétition
	Surface des parcelles

DURANT L'ANNÉE 1, année de semis de la culture de couverture (CC)

- Rendements en biomasse**
- Biomasse aérienne de la CC (kg/ha)
 - Rendement de la culture compagne dans le système intercalaire uniquement (T/ha)

- Propriétés de la CC**
- Rapport C/N
 - Concentration en N

APA ou Rendement en azote de la CC: Apport potentiel d'azote dans la biomasse aérienne de la CC

- **APA = Biomasse aérienne de la CC X Concentration en N de la CC**

DURANT L'ANNÉE 2, année de semis de la culture principale qui suit la CC

- Rendements en biomasse**
- Rendements en grain (T/ha) de la culture principale qui suit la CC (maïs, soja, céréales)
 - Rendements en grain (T/ha) de la culture principale (maïs, soja, céréales) dans les parcelles témoins (sans CC)
 - Rendements en paille (T/ha) de la culture principale qui suit la CC (maïs, soja, céréales)
 - Rendements en paille (T/ha) de la culture principale (maïs, soja, céréales) dans les parcelles témoins (sans CC)

- Rendements en azote de la culture principale (kg N/ha)**
- Rendements en azote dans le grain de la culture principale qui suit la CC (maïs, soja, céréales)
 - Rendements en azote dans le grain de la culture principale (maïs, soja, céréales) dans les parcelles témoins (sans CC)
 - Rendements en azote dans la paille de la culture principale qui suit la CC (maïs, soja, céréales)
 - Rendements en azote dans la paille de la culture principale (maïs, soja, céréales) dans les parcelles témoins (sans CC)
 - Rendements en azote total de la culture principale qui suit la CC (maïs, soja, céréales)
 - Rendements en azote total de la culture principale (maïs, soja, céréales) dans les parcelles témoins (sans CC)

Rapport de rendement (RR)

$$RR = \frac{\text{rendement de la culture principale précédée d'une culture de couverture à l'année 1}}{\text{au rendement de la parcelle témoin qui n'a pas reçu de culture de couverture à l'année 1}}$$

VARIABLES DE RÉPONSE

Équivalent minéral - Crédit azoté de la CC
 L'équivalent en fertilisation minérale est déterminé en utilisant les différentes doses d'azote apportées à la culture principale témoin (sans culture de couverture) afin de développer une courbe de réponse spécifique à chaque site. Chaque rendement spécifique d'une culture principale précédée d'une culture de couverture est ensuite reporté sur la courbe témoin pour calculer l'équivalent minéral qui aurait donné ce même rendement. L'équivalent minéral est calculé selon l'équation 4:

$$EM = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4c(a - RR_{CC_0})}}{2c}$$

où a représente l'intercept, b = le coefficient linéaire, c = le coefficient quadratique,
 RR_{CC₀} correspond au rendement en grain de la parcelle témoin qui n'a pas reçu de culture de couverture à l'année 1.

Coefficient d'utilisation de l'azote

$$CUA (\%) = \left(\frac{AG_{CC} - AG_{CC_0}}{APA} \right) \times 100$$

AG_{CC} correspond au rendement en azote dans le grain (kg N par hectare) de la culture principale précédée d'une culture de couverture, AG_{CC₀} correspond au rendement en azote dans le grain de la culture principale dans la parcelle témoin qui n'a pas reçu de culture de couverture à l'année 1, et APA correspond apport potentiel d'azote dans la biomasse aérienne de la culture de couverture (kg N par hectare).

Annexe B. Mots-clés utilisés pour les trois requêtes spécifiques dans la base de données de CAB Abstracts

For Goal 1 (cash crop yields)

- 1 (english or french).lg.
- 2 (maize or corn or soybean or canola or wheat or barley or oat* or rye or cereal crop* or cereal* grain or small cereal*) ti. and hw.
- 3 (green manure* or cover crop* or intercrop* or double crop* or overseed* or catch crop* or underseed* or interseed* or companion crop* or relay crop*) ti. and hw.
- 4 (performance* or yield* or production) ti. and hw.
- 5 1 and 2 and 3 and 4

For Goal 2 (N contribution and nitrate leaching)

- 1 (english or french).lg.
- 2 (maize or corn or soybean or canola or wheat or barley or oat* or rye or cereal crop* or cereal* grain or small cereal*) ti.
- 3 (green manure* or cover crop* or intercrop* or double crop* or overseed* or catch crop* or underseed* or interseed* or companion crop* or relay crop*) ti. and hw.
- 4 (nitrogen* or N or nitrate* or NO₃) ti. and hw.
- 5 1 and 2 and 3 and 4

For Goal 3 (soil quality)

- 1 (english or french).lg.
- 2 (maize or corn or soybean or canola or wheat or barley or oat* or rye or cereal crop* or cereal* grain or small cereal* and potatoe*) af.
- 3 (green manure* or cover crop* or intercrop* or double crop* or overseed* or catch crop* or underseed* or interseed* or companion crop* or relay crop*) ti.
- 4 (soil quality or soil structure or soil C or soil carbon or soil aggregate* or microbial biomass or particulate organic matter or soil organic carbon) af.
- 5 1 and 2 and 3 and 4

Annexe C- Références d'articles scientifiques de la méta-analyse et de la revue de littérature

Références pour l'objectif A seulement– Effets des CC sur le rendement des cultures subséquentes

1. Blackshaw, R. E., L. J. Molnar and J. R. Moyer (2010). "Sweet clover termination effects on weeds, soil water, soil nitrogen, and succeeding wheat yield." *Agronomy Journal* 102: 634-641.
2. Bullied, W. J., M. H. Entz, S. R. Smith, Jr. and K. C. Bamford (2002). "Grain yield and N benefits to sequential wheat and barley crops from single-year alfalfa, berseem and red clover, chickling vetch and lentil." *Canadian Journal of Plant Science* 82(1): 53-65.
3. Chen, S. Y., D. L. Wyse, G. A. Johnson, P. M. Porter, S. R. Stetina, D. R. Miller, K. J. Betts, L. D. Klossner and M. J. Haar (2006). "Effect of cover crops alfalfa, red clover, and perennial ryegrass on soybean cyst nematode population and soybean and corn yields in Minnesota." *Crop Science* 46(5): 1890-1897.
4. Cicek, H., M. H. Entz, J. R. T. Martens and P. R. Bullock (2014). "Productivity and nitrogen benefits of late-season legume cover crops in organic wheat production." *Canadian Journal of Plant Science* 94(4): 771-783.
5. Dapaah, H. K. and T. J. Vyn (1998). "Nitrogen fertilization and cover crop effects on soil structural stability and corn performance." *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 29(17/18): 2557-2569.
6. Drury, C. F., C. S. Tan, W. D. Reynolds, T. W. Welacky, S. E. Weaver, A. S. Hamill and T. J. Vyn (2003). "Impacts of zone tillage and red clover on corn performance and soil physical quality." *Soil Science Society of America Journal* 67: 867-877.
7. Duiker, S. W. and W. S. Curran (2005). "Rye cover crop management for corn production in the northern mid-atlantic region." *Agronomy Journal* 97: 1413-1418.
8. Eckert, D. J. (1988). "Rye cover crops for no-tillage corn and soybean production." *Journal of Production Agriculture* 1: 207-210.
9. Gaudin, A. C. M. J., Ken, B. Deen and D. C. Hooker (2015). "Wheat improves nitrogen use efficiency of maize and soybean-based cropping systems." *Agriculture, Ecosystems & Environment* 210: 1-10.
10. Holderbaum, J. F., A. M. Decker, J. J. Meisinger, F. R. Mulford and L. R. Vough (1990). "Fall-seeded legume cover crops for no-tillage corn in the humid east." *Agronomy Journal* 82: 117-124.
11. Kabir, Z. and R. T. Koide (2000). "The effect of dandelion or a cover crop on mycorrhiza inoculum potential, soil aggregation and yield of maize." *Agriculture, Ecosystems & Environment* 78(2): 167-174.
12. Kramberger, B., A. Gselman, M. Janzekovic, M. Kaligalic and B. Bracko (2009). "Effects of cover crops on soil mineral nitrogen and on the yield and nitrogen content of maize." *European Journal of Agronomy* 31(2): 103-109.
13. Lahti, T. and P. J. Kuikman (2003). "The effect of delaying autumn incorporation of green manure crop on N mineralization and spring wheat (*Triticum aestivum* L.) performance." *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 65(3): 265-280.
14. McCracken, D. V., S. J. Corak, M. S. Smith, W. W. Frye and R. L. Blevins (1989). "Residual effects of nitrogen fertilization and winter cover cropping on nitrogen availability." *Soil Science Society of America Journal* 53: 1459-1464.
15. Sarrantonio, M. and T. W. Scott (1988). "Tillage effects on availability of nitrogen to corn following a winter green manure crop." *Soil Science Society of America Journal* 52: 1661-1668.
16. Scott, T. W., J. M. Pleasant, R. F. Burt and D. J. Otis (1987). "Contributions of ground cover, dry matter, and nitrogen from intercrops and cover crops in a corn polyculture system."

Agronomy Journal 79(792-798).

17. Warnes, D. D., J. H. Ford, C. V. Eberlein and W. E. Lueschen (1991). "Effects of a winter rye cover crop system and available soil water on weed control and yield in soybeans." Cover crops for clean water: the proceedings of an international conference, West Tennessee Experiment Station.

Références pour les objectifs A et B – Effets des CC sur la contribution azotée et le rendement des cultures subséquentes

1. Abdollahi, M. M. and A. N'Dayegamiye (2000). "Effet de deux incorporations d'engrais verts sur le rendement et la nutrition en azote du blé (*Triticum aestivum* L.), ainsi que sur les propriétés physiques et biologiques du sol." *Can. J. Soil Sci.* 80: 81-89.
2. Andraski, T. W. and L. G. Bundy (2005). "Cover crop effects on corn yield response to nitrogen on an irrigated sandy soil." *Agronomy Journal* 97: 1239-1244.
3. Arlauskienė, A. and S. Maikstienienė (2008). "The effect of catch crop nitrogen on soil properties and spring barley yield." *Agronomijas Vestis* 10: 78-82.
4. Askegaard, M. and J. Eriksen (2008). "Residual effect and leaching of N and K in cropping systems with clover and ryegrass catch crops on a coarse sand." *Agriculture, Ecosystems & Environment* 123: 99-108.
5. Badararuddin, M. and D. W. Meyer (1990). "Green-manure legume effects on soil nitrogen, grain yield, and nitrogen nutrition of wheat." *Crop Science* 30: 819-825.
6. Baggs, E. M., C. A. Watson and R. M. Rees (2000). "The fate of nitrogen from incorporated cover crop and green manure residues." *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 56: 153-163.
7. Breland, T. A. (1996). "Green manuring with clover and ryegrass catch crops undersown in small grains: crop development and yields." *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B - Soil & Plant Science* 46: 178-185.
8. Cicek, H., J. R. T. Martens, K. C. Bamford and M. H. Entz (2015). "Late-season catch crops reduce nitrate leaching risk after grazed green manures but release N slower than wheat demand." *Agriculture, Ecosystems & Environment* 202: 31-41.
9. Clark, A. J., A. M. Decker and J. J. Meisinger (1994). "Seeding rate and kill date effects on hairy vetch-cereal rye cover crop mixtures for corn production." *Agronomy Journal* 86: 1065-1070.
10. Clark, A. J., A. M. Decker, J. J. Meisinger and M. S. McIntosh (1997a). "Kill date of vetch, rye, and a vetch-rye mixture: I. Cover crop and corn nitrogen." *Agronomy Journal* 89(427-434).
11. Clark, A. J., A. M. Decker, J. J. Meisinger and M. S. McIntosh (1997b). "Kill date of vetch, rye, and a vetch-rye mixture: II. Soil moisture and corn yield." *Agronomy Journal* 89: 434-441.
12. Clark, A. J., J. J. Meisinger, A. M. Decker and F. R. Mulford (2007a). "Effects of a grass-selective herbicide in a vetch-rye cover crop system on corn grain yield and soil moisture." *Agronomy Journal* 99(1): 43-48.
13. Clark, A. J., J. J. Meisinger, A. M. Decker and F. R. Mulford (2007b). "Effects of a grass-selective herbicide in a vetch-rye cover crop system on nitrogen management." *Agronomy Journal* 99(1): 36-42.
14. Corak, S. J., W. W. Frye and M. S. Smith (1991). "Legume mulch and nitrogen fertilizer effects on soil water and corn production." *Soil Science Society of America Journal* 55: 1395-1400.
15. De Bruin, J. L., P. M. Porter and N. R. Jordan (2005). "Use of a rye cover crop following corn in rotation with soybean in the upper Midwest." *Agronomy Journal* 97: 587-598.

16. Decker, A. M., A. J. Clark, J. J. Meisinger, F. R. Mulford and M. S. McIntosh (1994). "Legume cover crop contributions to no-tillage corn production." *Agronomy Journal* 86: 126-135.
17. Drury, C. F., C. S. Tan, T. W. Welacky, W. D. Reynolds, T. Q. Zhang, T. O. Oloya, N. B. McLaughlin and J. D. Gaynor (2014). "Reducing nitrate loss in tile drainage water with cover crops and water-table management systems." *Journal of Environmental Quality* 43: 587-598.
18. Halde, C., R. H. Gulden and M. H. Entz (2014). "Selecting cover crop mulches for organic rotational no-till systems in Manitoba, Canada." *Agronomy Journal* 106(4): 1193-1204.
19. Hesterman, O. B., T. S. Griffin, P. T. Williams, G. H. Harris and D. A. Christenson (1992). "Forage legume - small grain intercrops: nitrogen production and response of subsequent corn." *Journal of Production Agriculture* 5(3): 340-348.
20. Hively, W. D. and W. J. Cox (2001). "Interseeding cover crops into soybean and subsequent corn yields." *Agronomy Journal* 93(2): 308-313
21. Holderbaum, J. F., A. M. Decker, J. J. Meisinger, F. R. Mulford and L. R. Vough (1990). "Harvest management of a crimson clover cover crop for no-tillage corn production." *Agronomy Journal* 82: 918-923.
22. Huntington, T. G., J. H. Grove and W. W. Frye (1985). "Release and recovery of nitrogen from winter annual cover crops in no-till corn production." *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 16(2): 193-211.
23. Kaspar, T. C., D. B. Jaynes, T. B. Parkin and T. B. Moorman (2007). "Rye cover crop and gamagrass strip effects on NO₃ concentration and load in tile drainage." *Journal of Environmental Quality* 36: 1503-1511.
24. Kaspar, T. C., D. B. Jaynes, T. B. Parkin, T. B. Moorman and J. W. Singer (2012). "Effectiveness of oat and rye cover crops in reducing nitrate losses in drainage water." *Agricultural Water Management* 110: 25-33.
25. Liebman, M., R. L. Graef, D. Nettleton and C. A. Cambardella (2012). "Use of legume green manures as nitrogen sources for corn production." *Renewable Agriculture and Food Systems* 27(3): 180-191.
26. Loes, A. K., T. M. Henriksen, R. Eltun and H. Sjursen (2011). "Repeated use of green-manure catch crops in organic cereal production - grain yields and nitrogen supply." *Acta Agriculturae Scandinavica. Section B, Plant Soil Science* 61(2): 164-175.
27. Mitchell, W. H. and M. R. Teel (1977). "Winter-annual cover crops for no-tillage corn production." *Agronomy Journal* 69: 569-573.
28. Moore, E. B., M. H. Wiedenhoef, T. C. Kaspar and C. A. Cambardella (2014). "Rye Cover Crop Effects on Soil Quality in No-Till Corn Silage-Soybean Cropping Systems." *Soil Science Society of America Journal* 78(3): 968-976.
29. N'Dayegamiye, A. and T. Thi Sen (2001). "Effects of green manures on soil organic matter and wheat yields and N nutrition." *Canadian Journal of Soil Science* 81(4): 371-382.
30. N'Dayegamiye, A., J. K. Whalen, G. Tremblay, J. Nyiraneza, M. Grenier, A. Drapeau and M. Bipfubusa (2015). "The Benefits of Legume Crops on Corn and Wheat Yield, Nitrogen Nutrition and Soil Properties."
31. Parr, M., J. M. Grossman, S. C. Reberg-Horton, C. Brinton and C. Crozier (2011). "Nitrogen delivery from legume cover crops in no-till organic corn production." *Agronomy Journal* 103(6): 1578-1590.
32. Power, J. F., J. W. Doran and P. T. Koerner (1991). "Hairy vetch as a winter cover crop for dryland corn production." *Journal of Production Agriculture* 4: 62-67.
33. Richards, I. R., P. A. Wallace and I. D. S. Turner (1996). "A comparison of six cover crop types in terms of nitrogen uptake and effect on response to nitrogen by a subsequent spring barley crop." *Journal of Agricultural Science* 127(4): 441-449.

34. Ross, S. M., J. R. King, R. C. Izaurralde and J. T. O'Donovan (2009). "The green manure value of seven clover species grown as annual crops on low and high fertility temperate soils." *Canadian Journal of Plant Science* 89: 465-476.
35. Singer, J. W. and K. A. Kohler (2005). "Rye cover crop management affects grain yield in a soybean-corn rotation." *Crop Management*.
36. Stopes, C., S. Millington and L. Woodward (1996). "Dry matter and nitrogen accumulation by three leguminous green manure species and the yield of a following wheat crop in an organic production system." *Agriculture, Ecosystems & Environment* 57(2/3): 189-196.
37. Stute, J. K. and J. L. Posner (1995). "Legume cover crops as a nitrogen source for corn in an oat-corn rotation." *Journal of Production Agriculture* 8(3): 385-390.
38. Swanton, C. J., K. Chandler and K. J. Janovicek (1996). "Integration of cover crops into no-till and ridge-till wheat (*Triticum aestivum* L.)-corn (*Zea mays* L.) cropping sequence." *CJPS* 76: 85-91.
39. Talgre, L., E. Lauringson and A. Makke (2010). "Amounts of nitrogen and carbon returned to soil depending on green manure and the effect on winter wheat yield." *Agronomy Research* 8(Special II): 487-492.
40. Talgre, L., E. Lauringson, H. Roostalu, A. Astover, V. Eremeev and A. Selge (2009). "The effects of pure and undersowing green manures on yields of succeeding spring cereals." *Acta Agriculturae Scandinavica. Section B, Plant Soil Science* 59(1): 70-76.
41. Thiessen Martens, J. R., M. H. Entz and J. W. Hoepfner (2005). "Legume cover crops with winter cereals in southern Manitoba: Fertilizer replacement values for oat." *Canadian Journal of Plant Science* 85: 645-648.
42. Thilakarathna, M. S., S. Serran, J. Lauzon, K. Janovicek and W. Deen (2015). "Management of manure nitrogen using cover crops." *Agronomy Journal* 107: 1595-1607.
43. Tiffin, P. and O. B. Hesterman (1998). "Response of corn grain yield to early and late killed red clover green manure and subirrigation." *Journal of Production Agriculture* 11: 112-121.
44. Utomo, M., W. W. Frye and R. L. Blevins (1990). "Sustaining soil nitrogen for corn using hairy vetch cover crop." *Agronomy Journal* 82(5): 979-983.
45. Vyn, T. J., K. J. Janovicek, M. H. Miller and E. G. Beauchamp (1999). "Soil nitrate accumulation and corn response to preceding small-grain fertilization and cover crops." *Agronomy Journal* 91(1): 17-24.
46. Vyn, T.J., Faber, J.G., Janovicek, K.J., Beauchamp, E.G., 2000. Cover crop effects on nitrogen availability to corn following wheat. *Agronomy Journal* 92, 915-924.
47. Wagger, M. G. (1989). "Cover crop management and nitrogen rate in relation to growth and yield of no-till corn." *Agronomy Journal* 81: 533-538.
48. Wagger, M. G. (1989). "Time of desiccation effects on plant composition and subsequent nitrogen release from several winter annual cover crops." *Agronomy Journal* 81: 236-241.
49. Wilczewski, E., A. Piotrowska-Dlugosz and G. Lemanczyk (2015). "Properties of Luvisol and spring barley yield as affected by peas as a catch crop." *Zemdirbyste* 102(1): 23-30.
50. Wivstad, M., L. Salomonsson and A.-C. Salomonsson (1996). "Effects of green manure, organic fertilizers and urea on yield and grain quality of spring wheat." *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B - Soil & Plant Science* 46: 169-177.

Références additionnelles non incluses dans la base de données mais ayant servi à la discussion des résultats

- Bouwman, A. F., Boumans, L. J. M., & Batjes, N. H. (2002). Modeling global annual N₂O and NO emissions from fertilized fields. *Global Biogeochemical Cycles*, 16(4).
- Buckingham, S., Anthony, S., Bellamy, P. H., Cardenas, L. M., Higgins, S., McGeough, K., & Topp, C. F. E. (2014). Review and analysis of global agricultural N₂O emissions relevant to the UK. *Science of the Total Environment*, 487, 164-172.
- Cherr, C.M., Scholberg, J.M.S., McSorley, R., 2006. Green manure as nitrogen source for sweet corn in a warm-temperate environment. *Agronomy Journal* 98, 1173-1180.
- Gaudin, A., Westra, S., Loucks, C. E., Janovicek, K., Martin, R. C., & Deen, W. (2013). Improving resilience of Northern field crop systems using inter-seeded red clover: A Review. *Agronomy*, 3(1), 148-180.
- Garand, M.J., Simard, R.R., MacKenzie, A.F., Hamel, C., 2001. Underseeded clover as a nitrogen source for spring wheat on a Gleysol. *Canadian Journal of Soil Science* 81, 93-102.
- Gentry, L. E., Snapp, S. S., Price, R. F., & Gentry, L. F. (2013). Apparent red clover nitrogen credit to corn: evaluating cover crop introduction. *Agronomy Journal*, 105(6), 1658-1664.
- Golchin, A., Oades, J.M., Skjemstad, J.O., Clarke, P., 1994. Soil structure and carbon cycling. *Australian Journal of Soil Research* 32, 1043-1068.
- Kuo, S., Sainju, U.M., Jellum, E., 1996. Winter cover cropping influence on nitrogen mineralization, presidedress soil nitrate test, and corn yields. *Biology and Fertility of Soils* 22, 310-317.
- Lory, J. A., Russelle, M. P., & Peterson, T. A. (1995). A comparison of two nitrogen credit methods: traditional vs. difference. *Agronomy journal*, 87(4), 648-651.
- Marcillo, G. S., & Miguez, F. E. (2017). Corn yield response to winter cover crops: An updated meta-analysis. *Journal of Soil and Water Conservation*, 72(3), 226-239.
- Miguez, F.E., Bollero, G.A., 2005. Review of corn yield response under winter cover cropping systems using meta-analytic methods. *Crop Science* 45, 2318-2329.
- Reeves, D.W. 1994. Cover crops and rotations. In *Crops Residue Management*, ed. J.L. Hatfield and B.A. Stewart, pp. 125-172. *Advances in Soil Science*. Boca Raton, FL.
- Ruffo, M. L., & Bollero, G. A. (2003). Modeling rye and hairy vetch residue decomposition as a function of degree-days and decomposition-days. *Agronomy Journal*, 95(4), 900-907.
- Smith, M.S., Frye, W.W., Varco, J.J., 1987. Legume winter cover crops. *Advances in Soil Science* 7, 95-139.
- Tonitto, C., David, M.B., Drinkwater, L.E., 2006. Replacing bare fallows with cover crops in fertilizer-intensive cropping systems: A meta-analysis of crop yield and N dynamics. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 112, 58-72.
- Tremblay, N., Bouroubi, Y. M., Bélec, C., Mullen, R. W., Kitchen, N. R., Thomason, W. E., ... & Vories, E. D. (2012). Corn response to nitrogen is influenced by soil texture and weather. *Agronomy Journal*, 104(6), 1658-1671.

Références des études ayant servi à la méta-analyse (Objectifs A et B)

Authors, collaborators	Year	Title
Quebec and the Maritimes, Canada		
Langelier and Vanasse	2017	Caractérisation des apports d'azote et de la qualité du sol des systèmes a
Carl Bérubé	2016	Legumes in successive system preceding corn, St-Stanislas, Quebec
Madden, R.	2015	Productivity and biological nitrogen fixation of novel green manures in Eas
CETAB - CRSNG	2014	Fertilisation écologique des cultures grâce à l'utilisation d'engrais verts (5 :
CETAB - PADAAR	2014	Évaluation de différents trèfles intercalaires comme précédent du maïs gra
CETAB - PAN PAAR	2014	Contribution économique et agroenvironnementale des engrais verts en lie
CETAB - PAN Prime-Vert	2014	Contribution économique et agroenvironnementale des engrais verts et
Verville and Vanasse	2014	Effets de la diversification des systèmes culturaux et du précédent cultural
Thibaudeau S.	2013	Développement des systèmes de semis direct sous couverture végétale
Leroux G. et al.	2011	Évaluation des cultures de couverture de vesce velue et de seigle d'autom
Bourgeois et al., Club de l'Estrie	2010	Essai à la ferme de l'efficacité de cultures d'engrais verts intercalaires sur
Samson, R. A.	1989	On-farm Evaluation of Cultivation, Cover Crops and Chemical Banding fo
		Farming Systems. Masters Thesis, Plant Science Department, Macdona
		Bellevue, Quebec, 156 pp.
Ontario, Canada		
Belfry K. and Van Eerd L.	2015	Establishment and impact of cover crops intersown into corn
SWEEP (Drury et al.)	1998	Effects of Crop Residue in Conservation Tillage Systems on Soil Quality a
SWEEP (Samson et al.)	1992	Field Testing of Cover Crops for Corn and Soybean Production. Soil and
SWEEP (Samson et al.)	1992	Effect of Winter Rye Mulches and Fertilizer Amendments on Nutrient and
SWEEP (Samson et al.)	1992	Manure Management in Conservation Farming. Soil and Water Environme
SWEEP (CMS Research Services)	1991	Cereal cover crop study.
SWEEP (Samson et al.)	1990	Choice and Management of Cover Crop Species and Varieties for Use in f
		Environmental Enhancement Program (SWEEP) Report #12, Agriculture C
United States of America		
Stefan Gailans (Practical Farmers Report)	2014	Side-dressing corn following a winter rye cover crop -- Updated 2014

Références pour l'objectif C- revue de littérature sur les effets des CC sur la qualité des sols et le lessivage

1. Abdollahi, M. M., et N'Dayegamiye, A. 2000. Effects of two incorporations of green manures on soil physical and biological properties and on wheat (*Triticum aestivum* L.) yields and N uptake. *Can. J. Soil Sci.* 80:81-89.
2. Acuna, J. C. M., et Villamil, M. B. 2014. Short-term effects of cover crops and compaction on soil properties and soybean production in Illinois. *Agron. J.* 106:860-870.
3. Angers, D. 1998. Water-stable aggregation of Quebec silty clay soils: some factors controlling its dynamics. *Soil Till. Res.* 47:91-96.
4. Arlauskienė, A., Maikstenienė, S., 2008. The effect of catch crop nitrogen on soil properties and spring barley yield. *Agronomijas Vestis* 10, 78-82.
5. Arlauskienė, A., Maikstenienė, S., 2010. The effect of cover crop and straw applied for manuring on spring barley yield and agrochemical soil properties. *Zemdirbyste* 97, 61-72.
6. Abdollahi, M. M., et N'Dayegamiye, A. 2000. Effects of two incorporations of green manures on soil physical and biological properties and on wheat (*Triticum aestivum* L.) yields and N uptake. *Can. J. Soil Sci.* 80:81-89.
7. Ball-Coelho, B.R., Roy, R.C. et Swanton, C.J. 2000. Tillage and cover crop impacts on aggregation of a sandy soil. *Can. J. Soil Sci.* 80: 363-366.
8. Basche, A. D., Archontoulis, S. V., Kaspar, T. C., Jaynes, D. B., Parkin, T. B., et Miguez, F. E. 2016. Simulating long-term impacts of cover crops and climate change on crop production and environmental outcomes in the Midwestern United States. *Agric. Ecosyst. Environ.* 218:95-106.
9. Berhe, A. A., Harte, J., Harden, J., et Torn, M. S. 2007. Significance of the erosion-induced terrestrial carbon sink. *BioScience* 57:337-346.
10. Blanco-Canqui, H., Holman, J.D., Schlegel, A.J., Tatarko, J., et Shaver, T. 2013. Replacing fallow with cover crops in a semiarid soil: Effects on soil properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 77: 1026-1034.
11. Blanco-Canqui, H., Mikha, M. M., Presley, D. R., et Claassen, M. M. 2011. Addition of cover crops enhance no-till potential for improving soil physical properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 75:1471-1482.
12. Blanco-Canqui, H., Shaver, T. M., Lindquist, J. L., Shapiro, C. A., Elmore, R. W., Francis, C. A., et Hergert, G. W. 2015. Cover crops and ecosystem services: insights from studies in temperate soils. *Agron. J.* 107:2449-2474.
13. Breland, T. A. 1995. Green manuring with clover and ryegrass catch crops undersown in spring wheat: effects on soil structure. *Soil Use Manage.* 11:163-167.
14. Carter, M. R., et Kunelius, H. T. 1993. Effect of undersowing barley with annual ryegrasses or red clover on soil structure in a barley-soybean rotation. *Agric. Ecosyst. Environ.* 43:245-254.
15. Chen, G., et Weil, R. R. 2010. Penetration of cover crop roots through compacted soils. *Plant Soil* 331:31-43.
16. Cherr, C. M., Scholberg, J. M. S., et McSorley, R. 2006. Green manure approaches to crop production: a synthesis. *Agron. J.* 98:302-319.

16. Constantin, J., Mary, B., Laurent, F., Aubrion, G., Fontaine, A., Kervilliant, P. et Beaudoin, N. 2010. Effects of catch crops, no till and reduced nitrogen fertilization on nitrogen leaching and balance in tree long-term experiments. *Agric. Ecosyst. Environ.* 135:268-278.
17. Cotrufo, M.F., M.D. Wallenstein, C.M. Boot, K. Deneff and E. Paul. 2013. The Microbial Efficiency-Matrix Stabilization (MEMS) framework integrates plant litter decomposition with soil organic matter stabilization: do labile plant inputs form stable soil organic matter? *Global Change Biology* (2013) 19, 988-995.
18. Cresswell, H. P., et Kirkegaard, J. A. 1995. Subsoil amelioration by plant roots: The process and the evidence. *Aust. J. Soil Res.* 33:221-239.
19. Dabney, S. M., Delgado, J. A., et Reeves, D. W. 2001. Using winter cover crops to improve soil and water quality. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 32:1221-1250.
20. Dapaah, H. K., et Vyn, T. J. 1998. Nitrogen fertilization and cover crop effects on soil structural stability and corn performance. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 29:2557-2569.
21. Degens, B. P. 1997. The contribution of carbohydrate C and earth-worm activity to the water-stable aggregation of a sandy soil. *Aust. J. Soil Res.* 35:61-71.
22. Drury, C. F., Stone, J. A., et Findlay, W. I. 1991. Microbial biomass and soil structures associated with corn, grasses, and legumes. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55:805-811.
23. Drury, C. F., Tan, C. S., Reynolds, W. D., Welacky, T. W., Weaver, S. E., Hamill, A. S., et Vyn, T. J. 2003. Impacts of zone tillage and red clover on corn performance and soil physical quality. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67:867-877.
24. Drury, C. F., Tan, C. S., Welacky, T. W., Oloya, T. O., Hamill, A. S., et Weaver, S. E. 1999. Red clover and tillage influence soil temperature, moisture, and corn emergence. *Agron. J.* 91:101-108.
25. Edwards, L.M., 1989. Dry matter growth performance of red clover and Italian ryegrass as cover crops spring-seeded into fall-seeded winter rye in relation to soil physical characteristics. *Journal of Soil and Water Conservation* 44, 243-247.
26. Fae, G. S., Sulc, R. M., Barker, D. J., Dick, R. P., Eastridge, M. L., et Lorenz, N. 2009. Integrating winter annual forages into a no-till corn silage system. *Agron. J.* 101:1286-1296.
27. Folorunso, O. A., Rolston, D. E., Prichard, T., et Louie, D. T. 1992. Soil surface strength and infiltration rate as affected by winter cover crops. *Soil Technol.* 5:189-197.
28. Frankenberger, W. T. J., et Abdelmagid, H. M. 1985. Kinetic parameters of nitrogen mineralization rates of leguminous crops incorporated into soil. *Plant Soil* 87:257-271.
29. Franzluebbers, A. J., et Arshad, M. A. 1996. Soil organic matter pools during early adoption of conservation tillage in northwestern Canada. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60:1422-1427.
30. Frimmel, F.H. and R.F. Christman. 1988. Humic substances and their role in the environment. Wiley, Chichester.
31. Garcia-Franco, N., Albaladejo, J., Almagro, M., Martínez-Mena, M., 2015. Beneficial effects of reduced tillage and green manure on soil aggregation and stabilization of organic carbon in a Mediterranean agroecosystem. *Soil and Tillage Research* 153, 66-75.
32. Grandy, A.S. and G.P. Robertson. 2007. Land-use intensity effects on soil organic carbon accumulation rates and mechanisms. *Ecosystems* 10, 58-73.
33. Hadas, A., Parkin, T. B., et Stahl, P. D. 1998. Reduced CO₂ release from decomposing wheat

- straw under N-limiting conditions: simulation of carbon turnover. *Eur. J. Soil Sci.* 49:487-494.
34. Hassink, J., et Whitmore, A. P. 1997. A model of the physical protection of organic matter in soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61:131-139.
 35. Hubbard, R.K., Strickland, T.C., Phatak, S., 2013. Effects of cover crop systems on soil physical properties and carbon/nitrogen relationships in the coastal plain of southeastern USA. *Soil Tillage Research* 126, 276-283.
 36. Kabir, Z., Koide, R.T., 2000. The effect of dandelion or a cover crop on mycorrhiza inoculum potential, soil aggregation and yield of maize. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 78, 167-174.
 37. Känkänen, H., Kangas, A., Mela, T., Nikunen, U., Tuuri, H., et Vuorinen, M. 1998. Timing incorporation of different green manure crops to minimize the risk of nitrogen leaching. *Agric. Food Sci. Finl.* 7:553-567.
 38. Kätterer, T., Bolinder, M. A., Andr en, O., Kirchmann, H., et Menichetti, L. 2011. Roots contribute more to refractory soil organic matter than above-ground crop residues as revealed by a long-term field experiment. *Agric. Ecosyst. Environ.* 141:184-192.
 39. Keisling, T. C., Scott, H. D., Waddle, B. A., Williams, W., et Frans, R. E. 1994. Winter cover crops influence on cotton yield and selected soil properties. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 25:3087-3100.
 40. Kristensen, H.L. et Thorup-Kristensen, K. 2004. Root growth and nitrate uptake of three different catch crops in deep soil layers. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68 :529-527
 41. Kuo, S., Jellum, E. J., et Sainju, U. M. 1995. The effect of winter cover cropping on soil and water quality. *Proc. Western Nutrient Mgt. Conf. Salt Lake City, Utah.* pp. 56-64.
 42. Kuo, S., Sainju, U. M., et Jellum, E. J. 1997. Winter cover crop effects on soil organic carbon and carbohydrate in soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61:145-152.
 43. Lal, R. 2001. World cropland soils as a source or sink for atmospheric carbon. *Adv. Agron.* 71:145-191.
 44. Latif, M. A., Mehuys, G. R., Mackenzie, A. F., Alli, I., et Faris, M. A. 1992. Effects of legumes on soil physical quality in a maize crop. *Plant Soil* 140:15-23.
 45. Licht, M.A., Al-Kaisi, M., 2005. Strip-tillage effect on seedbed soil temperature and other soil physical properties. *Soil and Tillage Research* 80, 233-249.
 46. Mancinelli, R., Marinari, S., Di Felice, V., Savin, M.C., Campiglia, E., 2013. Soil property, CO₂ emission and aridity index as agroecological indicators to assess the mineralization of cover crop green manure in a Mediterranean environment. *Ecological Indicators* 34, 31-40.
 47. McVay, K. A., Radcliffe, D. E., et Hargrove, W. L. 1989. Winter legume effects on soil properties and nitrogen fertilizer requirements. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53:1856-1862.
 48. Miller, D.R., Dick, R.P., 1995. Dynamics of soil C and microbial biomass in whole oil and aggregates in two cropping systems. *Applied Soil Ecology* 2, 253-261.
 49. Moore, E. B., Wiedenhoft, M. H., Kaspar, T. C., et Cambardella, C. A. 2014. Rye cover crop effects on soil quality in no-till corn silage-soybean cropping systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 78:968-976.
 50. Nascente, A.S., Li, Y.C., Crusciol, C.A.C., 2013. Cover crops and no-till effects on physical fractions of soil organic matter. *Soil and Tillage Research* 130, 52-57.

51. N'Dayegamiye, A., et Thi Sen, T. 2001. Effects of green manures on soil organic matter and wheat yields and N nutrition. *Can. J. Soil Sci.* 81:371-382.
52. N'Dayegamiye, A., et Tran, T. S. 2002. Effet de deux incorporations d'engrais verts sur le rendement du blé, la disponibilité en azote, ainsi que sur les propriétés physiques et biologiques du sol. *Agrosol* 13:47-57.
53. N'Dayegamiye, A., Whalen, J. K., Tremblay, G., Nyiraneza, J., Grenier, M., Drapeau, A., et Bipfubusa, M. 2015. The benefits of legume crops on corn and wheat yield, nitrogen nutrition and soil properties. *Agron. J.* 107:1653-1665.
54. Olson, K., Ebelhar, S. A., et Lang, J. M. 2014. Long-term effects of cover crops on crop yields, soil organic carbon stocks and sequestration. *Open J. Soil Sci.* 4:65-70.
55. Perfect, E., Kay, B. D., van Loon, W. K. P., Sheard, R. W., et Pojasok, T. 1990a. Factors influencing soil structural stability within a growing season. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54:173-179.
56. Perfect, E., Kay, B. D., van Loon, W. K. P., Sheard, R. W., et Pojasok, T. 1990b. Rates of changes in soil structural stability under forages and corn. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54: 179-186.
57. Peters, S.E., M. Wander, L.S. Sapirito, G.H. Harris and D.B. Friedman. 1997. Management impacts on SOM and related soil properties in a long-term farming systems trial in Pennsylvania. In: *Soil Organic Matter in Temperate Agroecosystems* (eds Paul E.A., Elliot E.T., Pautin K.H., Cole, C.V.) 183-196. CRC Press, Boca Raton, FL.
58. Piotrowska, A., et Wilczewski, E. 2012. Effects of catch crops cultivated for green manure and mineral nitrogen fertilization on soil enzyme activities and chemical properties. *Geoderma* 189-190:72-80.
59. Poeplau, C., et Don, A. 2015. Carbon sequestration in agricultural soils via cultivation of cover crops: A meta-analysis. *Agric. Ecosyst. Environ.* 200:33-41.
60. Puget, P., et Drinkwater, L. E. 2001. Short-term dynamics of root- and shoot-derived carbon from a leguminous green manure. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65:771-779.
61. Quemada, M., Baranski, M., Nobel-de-Lange, M.N.J., Vallejo, A. et Cooper, J.M. 2013. Meta-analysis of strategies to control nitrate leaching in irrigated agricultural systems and their effects on crop yield. *Agric. Ecosyst. Environ.* 174:1-10.
62. Quemada, M., et Cabrera, M. L. 1995. Carbon and nitrogen mineralized from leaves and stems of four cover crops. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59:471-477.
63. Ranells, N. N., et Waggoner, M. G. 1997. Grass-legume bicultures as winter annual cover crops. *Agron. J.* 89:659-665.
64. Reeves, D.W. 1994. Cover crops and rotations. In *Crops Residue Management*, ed. J.L. Hatfield and B.A. Stewart, pp. 125-172. *Advances in Soil Science*. Boca Raton, FL.
65. Sainju, U. M., et Singh, B. P. 1997. Winter cover crops for sustainable agricultural systems: influence on soil properties, water quality, and crop yields. *HortScience* 32:21-28.
66. Sainju, U.M., Whitehead, W.F., Singh, B.P., 2003. Cover crops and nitrogen fertilization effects on soil aggregation and carbon and nitrogen pools. *Canadian Journal of Soil Science* 83, 155-165.
67. Smith, M. S., Frye, W. W., et Varco, J. J. 1987. Legume winter cover crops. *Adv. Soil Sci.* 7:95-139.
68. Somda, Z. C., Ford, P. B., et Hargrove, W. L. 1991. Decomposition and nitrogen recycling of

- cover crops and cover crop residues. In *Cover crops for clean water*, W. L. Hargrove, ed., pp. 103-105, West Tennessee Experiment Station, Jackson, TN.
69. Stavi, I., Lal, R., Jones, S., et Reeder, R. C. 2012. Implications of cover crops for soil quality and geodiversity in a humid-temperate region in the midwestern USA. *Land Degrad. Dev.* 23:322-330.
 70. Stone, J. A., et Buttery, B. R. 1989. Nine forages and the aggregation of a clay loam soil. *Can. J. Soil Sci.* 69:165-169.
 71. Teixeira, E.I., Johnstone, P., Chakwizira, E., de Ruiter, J., Malcolm, B., Shaw, N., Zyskowski, R., Khaembah, E., Sharp, J., Meenken, E., Fraser, P., Thomas, S., Brown, H. et Curtin, D. 2016. Sources of variability in the effectiveness of winter cover crops for mitigating N leaching. *Agric. Ecosyst. Environ.* 220:226-235.
 72. Tejada, M., Gonzalez, J.L., Garcia-Martinez, A.M., Parrado, J., 2008. Effects of different green manures on soil biological properties and maize yield. *Bioresource Technology* 99, 1758-1767.
 73. Thorup-Kristensen, K. 2001. Are differences in root growth of nitrogen catch crops important for their ability to reduce soil nitrate-N content, and how can this be measured? *Plant and Soil.* 230:185-195.
 74. Thorup-Kristensen, K., Magid, J., et Jensen, L. S. 2003. Catch crops and green manures as biological tools in nitrogen management in temperate zones. *Adv. Agron.* 79:227-302.
 75. Tisdall, J. M., et Oades, J. M. 1982. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *J. Soil Sci.* 33:141-163.
 76. Tonito, C., David, M.B. et Drinkwater, L.E. 2006. Replacing bare fallows with cover crops in fertilizer-intensive cropping systems: A meta-analysis of crop yield and N dynamics. *Agric. Ecosyst. Environ.* 112: 58-72.
 77. Valkama, E., Lemola, R., Känkänen, H. et Turtola, E. 2015. Meta-analysis of the effects of undersown catch crops on nitrogen leaching loss and grain yields in the Nordic countries. 2015. *Agric. Ecosyst. Environ.* 203:93-101.
 78. Villamil, M. B., Bollero, G. A., Darmody, R. G., Simmons, F. W., et Bullock, D. G. 2006. No-till corn/soybean systems including winter cover crops: effects on soil properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70:1936-1944.
 79. Wagger, M. G., et Denton, H. P. 1989. Influence of cover crop and wheel traffic on soil physical properties in continuous no-till corn. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53:1206-1210.
 80. Wilczewski, E., Iotrowska-Dlugosz, A., et Lemanczyk, G. 2014. Influence of catch crop on soil properties and yield of spring barley. *Int. J. Plant Prod.* 8:391-407.
 81. Wilczewski, E., Piotrowska-Dlugosz, A., et Lemanczyk, G. 2015. Properties of Luvisol and spring barley yield as affected by peas as a catch crop. *Zemdirbyste* 102:23-30.
 82. Wortman, S. E., Francis, C. A., et Lindquist, J. L. 2012. Cover crop mixtures for the western Corn Belt: Opportunities for increased productivity and stability. *Agron. J.* 104:699-705.

Annexe D. Effets des facteurs environnementaux et agronomiques sur le rapport de rendement du maïs consécutif aux cultures de couvertures – approche univariée

Tableau S 1. Effet significatif des facteurs environnementaux et agronomiques sur le rapport de rendement du maïs consécutif aux cultures de couverture - approche univariée

	Effets fixes sur le rapport de rendement	
	n	Pr > F
<u>Facteurs climatiques</u>		
Précipitations abondantes et bien réparties (PABR) ¹ , mm	1441	<.001
PABR ¹ année 1, mm	1231	<.0001
PABR ¹ année 2, mm	1421	ns
Normale de 30 ans de la température annuelle de l'air (MAT)	1616	ns
Déviations par rapport à MAT**	1612	ns
Déviations par rapport à MAT année 1**	1493	ns
Déviations par rapport à MAT année 2**	1612	ns
<u>Intrants azotés</u>		
Azote potentiel dans la biomasse aérienne, kg N ha ⁻¹	1205	<.0001
Dose d'azote appliquée au maïs, kg N ha ⁻¹	1619	<.0001
<u>Propriétés du sol</u>		
Matière organique du sol, %	1237	<.0001
Texture du sol	1559	ns
<u>Pratiques culturales</u>		
Type de cultures de couverture (CCType)	1646	<.0001
Système d'implantation de la CC (CCSyst)	1646	0.06
Culture commerciale à l'année 1	1488	0.07 [‡]
Régie (organique vs. conventionnelle)	1646	ns
Travail du sol	1646	ns

n, nombre total d'observations

¹ Le **PABR** est un indice des précipitations totales pondérées calculé selon Tremblay et al. (2012) du semis de la culture couverture à la récolte du maïs subséquent.

** Écart exprimé en % de la normale des 30 ans

[‡] 3 observations extrêmes d'une même étude ont été retirées (sols dégradés à très faible niveau de fertilité, répond fortement à l'azote, USA, Kentucky).

Annexe E. Effets des facteurs environnementaux et agronomiques sur le rapport de rendement du maïs consécutif aux cultures de couvertures - approche multivariée

	Effets fixes sur le rapport de rendement			
	n	Pr > F	dl	Valeur de F
Type de CC (CCType)	1274	<.0001	1219	17.04
Précipitations abondantes et bien réparties (PABR) ¹ , mm	1274	ns	711	0.03
Matière organique du sol, % - coef. linéaire (SOM)	1274	<.0001	51.1	14.43
Matière organique du sol, % - coef. quadratique	1274	<0.1	46.1	3.36
Dose d'azote appliqué au maïs, kg N ha ⁻¹ - coef. linéaire (Ferti)	1274	<.0001	1249	66.70
Dose d'azote appliqué au maïs, kg N ha ⁻¹ - coef. quadratique	1274	<.0001	1255	27.33
Ferti*CCType	1274	<.0001	1252	33.84
PABR X CCType	1274	<0.05	1218	2.90
SOM X Ferti	1274	<.0001	1226	27.21

n, number of observations

¹ PABR, c'est un indice des précipitations totales pondérées sur toute la durée de l'étude calculé selon Tremblay et al. (2012) du semis de la culture couverture à la récolte du maïs subséquent.

Annexe F. Effets des facteurs environnementaux et agronomiques sur le rapport de rendement des céréales suite aux cultures de couvertures – approche univariée

Tableau S.3. Effet significatif des facteurs environnementaux et agronomiques sur le rapport de rendement des céréales – modèle univarié

	Effets fixes sur le rapport de rendement	
	n	Pr > F
<u>Climatic factors</u>		
<u>Facteurs climatiques</u>		
Précipitations abondantes et bien réparties (PABR) ¹ , mm	394	<.001
Normale de 30 ans de la température annuelle de l'air (MAT)	372	<.001
Déviation par rapport à MAT**	393	ns
Déviation par rapport à MAT année 1**	362	ns
Déviation par rapport à MAT année 1**	408	ns
<u>Intrants azotés</u>		
Azote potentiel dans la biomasse aérienne , kg N ha ⁻¹	281	<.001
Dose d'azote appliquée aux céréales (Ferti), kg N ha ⁻¹	390	ns
- Orge	72	ns
- Avoine	39	ns
- Blé	274	ns
<u>Propriétés du sol</u>		
Matière organique du sol (0-10cm), %	346	ns
Texture du sol	373	ns
<u>Management practices</u>		
Type de CC (CCType)	420	<.0001
Culture commerciale à l'année 1	301	ns
Système d'implantation de la CC (CCSyst)	420	<.0001
Régie (organique vs. conventionnelle)	420	ns
Travail du sol	415	<.05

¹ Le **PABR** est un indice des précipitations totales pondérées calculé selon Tremblay et al. (2012) du semis de la culture de couverture à la récolte de la céréale subséquente.

Annexe G. Effets des facteurs environnementaux et agronomiques sur la quantité d'azote accumulée dans la biomasse aérienne des CC (ou apport potentiel d'azote, APA)

	Effets fixes sur l'apport potentiel d'azote		
	n	Pr > F	df
<u>Facteurs climatiques</u>			
PABR ¹ de l'année 1, mm	1385	<.0001	1334
Normale de 30 ans de la température annuelle de l'air (MAT)	1273	<.0001	15.1
Déviations par rapport à MAT de l'année 1	1221	0.0085	753
<u>Intrants azotés</u>			
Azote potentiel dans la biomasse aérienne, kg N ha ⁻¹	805	0.0447	786
Type de fertilisation appliquée aux CC, kg N ha ⁻¹ (CCFertiType) ²	721	ns	516
CCFertiType X CCType	721	<.0001	680
<u>Propriétés du sol</u>			
Matière organique du sol, %	1312	ns	108
Texture du sol	1596	ns	61.2
Texture du sol X PABR1	1353	0.0011	981
Texture grossière X PABR1	339	ns	244
Texture moyenne X PABR1	764	0.002	576
Texture fine X PABR1	250	<.0001	236
CCType X Texture du sol	1568	0.0008	1630
<u>Management practices</u>			
Type de CC (CCType)	1669	<.0001	1608
Culture commerciale à l'année 1	1513	0.0664	67.4
Système d'implantation des CC (CCSyst)	1669	<.0001	1456
Durée de croissance des CC (CCDurée), days	1548	<.0001	1451
CCDurée X CCSyst	1548	=0.1	1265
Régie (organique vs. conventionnelle)	1669	ns	50
Travail du sol	1669	ns	496

¹ PABR1, indice des précipitations totales pondérées calculé selon Tremblay et al. (2012) sur la durée de croissance de la culture de couverture (du semis à sa terminaison).

², aucune fertilisation, organique (liquide), organique (solide), engrais de synthèse