

IMPACT DE COUVERTS PERMANENTS SUR LE BLE TENDRE D'HIVER

J LABREUCHE ⁽¹⁾, P HAUPRICH ⁽²⁾, AM BODILIS ⁽³⁾, B SOENEN ⁽⁴⁾

⁽¹⁾ ARVALIS-Institut du végétal Station expérimentale 91720 BOIGNEVILLE – France

⁽²⁾ ARVALIS-Institut du végétal Complexe Agricole du Mont Bernard 1 Route de Suippes
51035 CHALONS EN CHAMPAGNE CEDEX - France

⁽³⁾ ARVALIS-Institut du végétal Station expérimentale de La Jaillière LA CHAPELLE SAINT
SAUVEUR 44370 LOIREAUXENCE – France

⁽⁴⁾ ARVALIS-Institut du végétal Station Inter-Instituts 6, Chemin de la Cote Vieille 31450
BAZIEGE – France

* Orateur et correspondant : j.labreuche@arvalisinstitutduvegetal.fr

RÉSUMÉ

Une synthèse de dix-sept essais permet d'évaluer l'impact de couverts pérennes de légumineuses sur le rendement du blé tendre d'hiver. Les couverts ont été détruits pendant le cycle du blé ou maintenus vivants. Leur effet sur le rendement du blé est variable et bien corrélé à leur impact sur la nutrition azotée du blé, avec une amélioration ou une dégradation selon les situations. La cinétique de croissance du couvert en automne et au printemps explique assez bien les résultats mesurés sur blé. L'idéal est de semer un blé sur un couvert développé et que ce dernier soit tué dans le blé ou bien maintenu à une très faible biomasse au printemps. Treize situations comparant des courbes de réponse à l'azote avec ou sans couvert permanent nous montrent qu'il est rarement judicieux de modifier les doses d'apport d'azote.

Mots-clés : couvert permanent, blé, luzerne, trèfle, compétition, facilitation, azote

INTRODUCTION

Sur le terrain en France, on utilise souvent le terme de couvert permanent pour décrire une plante de service pérenne dont le cycle de développement chevauche celui d'une culture commerciale, l'interculture qui suit cette culture et le début du développement de la culture commerciale suivante. Le terme de « permanent » est impropre car le cycle du couvert n'est pas infini et dure le plus souvent entre 18 et 36 mois. Une enquête a en effet montré que ce type de couvert était principalement présent sur trois enchainements de cultures : colza-blé ; colza-blé-blé ou orge d'hiver ; luzerne suivi d'une à trois céréales d'hiver (Labreuche et al., 2017).

La longue période de croissance de ce type de couvert permettrait d'en accroître les services écosystémiques par rapport à une culture intermédiaire maintenue seulement quelques mois : structuration du sol, lutte contre l'érosion, stimulation de l'activité biologique, séquestration de carbone, fixation symbiotique d'azote dans le cas de légumineuses, limitation de la croissance des adventices... Sur le plan de la production agricole, un couvert permanent se développe plus facilement pendant la période d'interculture qu'un couvert annuel, en particulier en cas d'intercultures courtes ou sèches. Le couvert permanent peut faciliter la croissance de la culture, par exemple au travers d'un impact sur la structure du sol ou de l'azote minéral disponible pour la culture. En revanche, il peut exercer une forte compétition sur la culture, pour la lumière, les nutriments ou l'eau du sol. Selon les dynamiques de croissance conjointes de la culture et du couvert ainsi que la conduite du système de culture, les mécanismes de facilitation ou compétition peuvent être complètement différents et aboutir à des rendements non impactés, parfois améliorés ou nettement réduits (Carof, 2006). La régulation du couvert est en particulier très importante : il s'agit d'une action visant à limiter la croissance du couvert pour

qu'il n'exerce pas de compétition trop forte sur la culture, avec des moyens mécaniques (travail du sol, broyage), chimiques (herbicides) ou biologiques (pouvoir compétitif de la culture dépendant de plusieurs facteurs en interaction : espèce, variété, date et densité de semis, écartement entre rangs, nutrition azotée...).

MATERIELS ET MÉTHODES

Dix-sept essais, suivis par ARVALIS – Institut du végétal, ont permis de réaliser 50 comparaisons de blé tendre d'hiver conduit avec ou sans couvert permanent (tableau 1). Ce dernier avait été implanté au plus tard quelques mois avant le semis du blé et parfois plus d'un an auparavant, par exemple en même temps que le précédent du blé. Nous avons exploité également trois essais sur orge de printemps pour certains paramètres : un essai courbe de réponse à l'azote ; mesure des reliquats d'azote minéral du sol en entrée d'hiver sous le couvert.

Les espèces de couvert implantées sont des légumineuses, principalement du trèfle blanc et de la luzerne. Deux types de gestion du couvert ont été réalisés :

- Le couvert a parfois été détruit dans le blé, d'octobre à mai selon les cas, volontairement ou non.
- Le couvert a parfois été maintenu vivant pendant tout le cycle du blé.

Dans ce dernier cas, la croissance du couvert a été régulée afin de limiter sa compétition vis-à-vis du blé. Des herbicides, sélectifs et homologués sur blé, ont été utilisés à cette fin. Pour les premiers essais réalisés, la connaissance de la sélectivité des herbicides sur les différentes légumineuses utilisées était limitée. Des erreurs dans la gestion du couvert ont pu survenir, soit une régulation insuffisante du couvert entraînant des chutes de rendement sur blé, soit une forte phytotoxicité entraînant la destruction involontaire du couvert.

L'objectif des essais était de mesurer les impacts de couverts permanents sur le rendement et les composantes du blé tendre d'hiver. Parmi les facteurs explicatifs mesurés figurent l'alimentation en azote et en eau, via respectivement le suivi de l'indice de nutrition azotée (INN) et le suivi de l'humidité du sol. La compréhension des mécanismes de compétition et facilitation entre le couvert et le blé a pour objectif de donner des pistes pour optimiser la conduite du couvert dans le blé.

Les protocoles de suivis des essais se sont perfectionnés au fil des années et ne sont pas parfaitement homogènes selon les essais. Les variables mesurées étaient en général :

- Le rendement du blé et ses composantes
- La teneur en protéines du blé
- La biomasse des parties aériennes du couvert et leur teneur en azote (jusqu'à 4 dates : au semis du blé, en sortie d'hiver, à la floraison du blé et à sa récolte)
- La biomasse des parties aériennes du blé et leur teneur en azote pour réaliser un suivi d'INN (jusqu'à 3 dates : en sortie d'hiver, à la floraison du blé et à sa récolte)
- Le stock d'azote minéral du sol (jusqu'à 3 dates : au semis du blé, en sortie d'hiver, à la récolte du blé)
- Des mesures complémentaires ont eu lieu dans certains essais : suivi de la teneur en eau du sol ; hauteur des couverts et du blé à différentes dates.

Des courbes de réponse à l'azote ont été réalisées dans cinq essais (Brives 2013 ; la Jaillièrre 2014 ; Dosnon 2016 ; Poix 2017 et Dosnon 2017). Ce dernier essai portait sur de l'orge de printemps et les quatre premiers sur blé (tableau 1). Ces courbes de réponse à l'azote permettent d'évaluer le rendement optimal et la dose d'azote optimale (plus petite dose d'azote nécessaire pour atteindre ce rendement optimal) par ajustement mathématique d'un modèle quadratique-plateau, avec et sans plante de couverture. Dans les autres essais, les doses d'azote apportées sur blé n'ont pas été différenciées. Elles correspondaient soit aux doses calculées selon la méthode du bilan (« X ») et sans prise en compte de la présence d'un couvert, soit à des doses légèrement plus basses (type « X-40 »).

Lieu	Culture (précédent)	Année récolte	Espèces de couvert	Date de semis / Destruction du couvert
Boigneville (91)	Blé tendre d'hiver (blé)	2009	Trèfle incarnat	Juillet 2008 / 29 juillet 2009
Boigneville (91)	Blé tendre d'hiver (colza)	2013	Trèfle blanc Trèfle blanc	Août 2011 / Octobre 2012 Août 2011 / Mars 2013
Brives (36)	Blé tendre d'hiver (colza)	2013	Luzerne	Août 2011 / 0 destruction
Boigneville (91)	Blé tendre d'hiver (jachère)	2014	Luzerne, Sainfoin, Minette, Mélilot Trèfle blanc, Lotier	Juillet 2013 / Mars 2014 Juillet 2013 / 0 destruction
Boigneville (91)	Blé tendre d'hiver (maïs g.)	2014	Trèfle blanc	Août 2012 / 0 destruction
La Jaillière (44)	Blé tendre d'hiver (maïs f.)	2014	Mélange de trèfles incarnat, Alexandrie et souterrain	Mai 2013 / Hiver 2013/2014
Boigneville (91)	Blé tendre d'hiver (jachère)	2015	Trèfles blanc, violet et souterrain, Minette Luzerne, Sainfoin, Mélilot, Lotier, Mélange de 6 légumineuses	Mars 2014 / Mai 2015 Mars 2014 / 0 destruction
La Jaillière (44)	Blé tendre d'hiver (blé)	2015	Trèfle blanc	Juillet 2014 / 0 destruction
Lavincourt (55)	Blé tendre d'hiver (pois p.)	2015	Luzerne	Avril 2014 / 0 destruction
Demange aux eaux (55)	Blé tendre d'hiver (colza)	2015	Luzerne	Août 2013 / 0 destruction
Boigneville (91)	Orge de p. (blé)	2015	Trèfle blanc	Août 2012 / 0 destruction
Boigneville (91)	Blé tendre d'hiver (blé)	2016	Luzerne	Mars 2014 / 0 destruction
Boigneville (91)	Blé tendre d'hiver (jachère)	2016	Trèfle blanc, Lotier Luzerne	Avril 2015 / Mai 2016 Avril 2015 / 0 destruction
Dosnon (10) avec le CETA de Romilly	Blé tendre d'hiver (colza)	2016	Trèfle blanc, Luzerne, Lotier Trèfle blanc, Luzerne, Lotier	Août 2014 / Mars à mai 2016 Août 2014 / 0 destruction
Demange aux eaux (55)	Blé tendre d'hiver (colza)	2016	Luzerne	Août 2014 / 0 destruction
La Jaillière (44)	Blé tendre d'hiver (colza)	2017	Lotier	Juillet 2014 / 0 destruction
St Hilaire en Woèvre (55)	Blé tendre d'hiver (maïs f. et colza)	2017	Trèfle blanc	Août 2015 / 0 destruction
Poix (51) avec l'AREP	Blé tendre d'hiver (colza)	2017	Trèfle blanc	Août 15 / Février 2017
Dosnon (10) avec le CETA de Romilly	Orge de p. (blé)	2017	Trèfle blanc, Lotier Trèfle blanc, Lotier	Août 2014 / Décembre 2016 Août 2014 / Avril 2017
Boigneville (91)	Orge de p. (blé)	2017	Luzerne	Avril 2015 / 0 destruction

Tableau 1 : Description des expérimentations évaluant l'impact de couverts permanents sur blé tendre d'hiver et orge de printemps.

Il faut être conscient des limites de la synthèse des essais qui va suivre pour plusieurs raisons :

- Tous les couverts n'ont pas été testés dans toutes les conditions et pour chaque date de destruction. La biomasse du couvert était parfois très différente d'un essai à l'autre, selon les conditions et la conduite de l'essai.
- Toutes les variables n'ont pas été mesurées dans chaque essai, ce qui peut créer un artefact dans les synthèses.
- Certains essais n'ont pas été conduits comme un essai analytique rigoureux, à savoir en comparant l'absence ou la présence d'un couvert, toutes choses égales par ailleurs. Dans certains cas, la conduite phytosanitaire a pu être différente entre modalités, par exemple pour réguler ou détruire un couvert. Le travail du sol a été différencié sur l'essai de la Jaillière en 2014, avec un blé semé en semis direct avec couvert et sur travail superficiel avec un cover crop sans couvert. Le travail du sol était plus fortement différencié sur l'essai de Brives en 2013 avec un couvert de luzerne sur un sol conduit en semis direct depuis 2000-2001 et l'absence de couvert sur un sol travaillé profond (labour puis chisel) depuis 2000-2001. La date de semis du blé était différente entre les deux systèmes. Au-delà de l'effet strict du couvert, c'est donc plutôt l'effet du couvert associé aux adaptations nécessaires de l'itinéraire pour introduire ces couverts, qui a été évalué dans cet essai.

RESULTATS ET DISCUSSION

1. IMPACT DE LA DYNAMIQUE DE CROISSANCE DU COUVERT SUR LES COMPOSANTES DE RENDEMENT DU BLE

L'impact des couverts permanents, tués dans le blé ou maintenus vivants, sur le rendement du blé, ses composantes et sa teneur en protéines est présenté tableau 2. On peut constater la variabilité des impacts sur le rendement. Toutes situations confondues, l'impact moyen des couverts est nul sur le rendement du blé (101% des témoins) mais avec une tendance à l'amélioration pour les couverts tués dans le blé (105%) et à la réduction avec les couverts vivants (97%, voir tableau 3). Dans les deux cas, il subsiste une forte variabilité des impacts. Au niveau des composantes de rendement, on observe une tendance à réduire la densité de levée et le nombre d'épis en présence d'une plante de couverture et à obtenir une compensation sur la fertilité des épis et le poids de mille grains (tableau 2). Dans ce jeu de données, le rendement est fortement corrélé au nombre de grains au mètre carré (r^2 de 0.80). Cette observation est cohérente avec d'autres données montrant une pénalité sur les premières composantes du rendement du blé, par exemple le nombre d'épis/m² (Shili-Touzi, 2009) ou la fertilité des épis (Carof *et al.*, 2007a). Cela donne des indices sur les processus incriminés : implantation du blé, compétition ou facilitation pour l'azote ou compétition pour le rayonnement. Une compétition pour l'eau semble moins probable. Concernant le rayonnement, plusieurs auteurs ont mesuré une diminution du rayonnement intercepté par le blé en présence de couverts pas suffisamment régulés (Shili-Touzi, 2009 ; Carof *et al.*, 2007b ; Hiltbrunner *et al.*, 2007).

La structure du sol peut dans certaines situations expliquer des écarts de potentiel de rendement. C'est le cas dans l'essai de la Jaillière récolté en 2014. Des courbes de réponse à l'azote ont été faites avec et sans couvert de trèfle. Sa présence n'a pas modifié la réponse du blé à l'azote mais a en revanche permis de déplaçonner le rendement de 10%, suite à une meilleure installation du blé pendant l'hiver. Une meilleure infiltration hivernale de l'eau sous le trèfle expliquerait cela, dans un contexte de limon hydromorphe sur schiste, lors d'un hiver très humide. Carof (2006) avait aussi mesuré une réduction de la porosité du sol en semis direct sans couvert par rapport au labour qui était compensée par la présence d'un couvert permanent de luzerne.

L'impact des couverts sur la teneur en protéines du blé est très légèrement amélioré en moyenne (102% des témoins, avec une variabilité d'environ $\pm 13\%$). La teneur moyenne en protéines et la variabilité sont identiques entre les couverts morts ou vivants dans le blé.

COMPOSANTE	NOMBRE DE COMPARAISONS	EN % DU TEMOIN			
		MINIMUM	MOYENNE	MAXIMUM	TEST DES DONNEES APPARIEES
PLANTES/M ²	28	74	89	118	*** (P-VALUE 0.0002)
EPIS/M ²	33	75	96	146	* (P-VALUE 0.08)
GRAINS/EPI	32	83	105	130	** (P-VALUE 0.03)
GRAINS/M ²	34	50	100	150	NS (P-VALUE 0.89)
POIDS DE MILLE GRAINS	34	78	101	112	NS (P-VALUE 0.43)
RENDEMENT	50	45	101	128	NS (P-VALUE 0.98)
TENEUR EN PROTEINES	36	86	102	113	** (P-VALUE 0.03)

Tableau 2 : Composantes de rendement obtenues en présence d'un couvert permanent en pourcentage des témoins sans couvert, toutes situations confondues. Analyse statistique par comparaison de moyenne par échantillons appariés. NS : Différence Non Significative ; * Différence significative à 10% ; ** différence significative à 5% ; *** différence significative à 1%

CONDUITE DU COUVERT	BIOMASSE AUTOMNALE DU COUVERT	BIOMASSE COUVERT FLORAISON	NOMBRE DE COMPARAISONS	RENDEMENT EN % DU TEMOIN			
				MINI MUM	MOYENNE	MAXI MUM	TEST DES DONNEES APPARIEES
TOUS COUVERTS			50	45	101	128	NS (P-VALUE 0.98)
COUVERTS MORTS		< 1 TMS/HA	23	92	105	119	** (P-VALUE 0.03)
COUVERTS MORTS	< 2 TMS/HA	< 1 TMS/HA	12	92	102	113	NS (P-VALUE 0.58)
COUVERTS MORTS	> 2 TMS/HA	< 1 TMS/HA	11	93	108	119	** (P-VALUE 0.01)
COUVERTS VIVANTS			27	45	97	128	NS (P-VALUE 0.36)
COUVERTS VIVANTS		< 1 TMS/HA	23	87	102	128	NS (P-VALUE 0.37)
COUVERTS VIVANTS	< 2 TMS/HA	< 1 TMS/HA	19	87	101	128	NS (P-VALUE 0.54)
COUVERTS VIVANTS	> 2 TMS/HA	< 1 TMS/HA	4	99	105	111	NS (P-VALUE 0.19)
COUVERTS VIVANTS		> 1 TMS/HA	4	45	69	83	* (P-VALUE 0.07)

Tableau 3 : Rendement obtenu en présence d'un couvert permanent en pourcentage des témoins sans couvert, selon la cinétique de croissance du couvert. La biomasse automnale du couvert correspond à la valeur la plus élevée de la biomasse mesurée avant le semis du blé ou en sortie d'hiver. Analyse statistique par comparaison de moyenne par échantillons appariés. NS : Différence Non Significative ; * Différence significative à 10% ; ** différence significative à 5% ; *** différence significative à 1%

L'impact des couverts sur le rendement du blé est assez bien corrélé ($r^2=0.56$) à leur impact sur l'indice de nutrition azotée (INN) du blé au stade floraison de ce dernier (figure 1). On peut noter que les couverts peuvent provoquer une variation d'INN floraison de ± 0.25 . Dans le jeu de données, les INN des témoins étaient inférieur à 0.9 dans 7 essais sur 9, ce qui peut expliquer qu'un écart d'INN soit assez bien lié à un effet sur le rendement. La corrélation entre les écarts d'INN floraison par rapport au témoin (± 0.25) et les écarts d'azote absorbé par le blé à la récolte (± 50 kg N/ha) est bonne (r^2 de 0.77), ce qui est logique dans la mesure où le blé était rarement « saturé » en azote.

On peut noter figure 1 que les couverts vivants ont des impacts variables (positifs ou négatifs) sur le rendement et l'INN floraison du blé. Les couverts morts ont des effets moins variables (de neutre à positif). Cela est assez logique dans la mesure où un couvert tué a peu de chance d'exercer une compétition sur le blé et au contraire plus de chances d'améliorer les fournitures en azote au blé, par minéralisation de ses résidus.

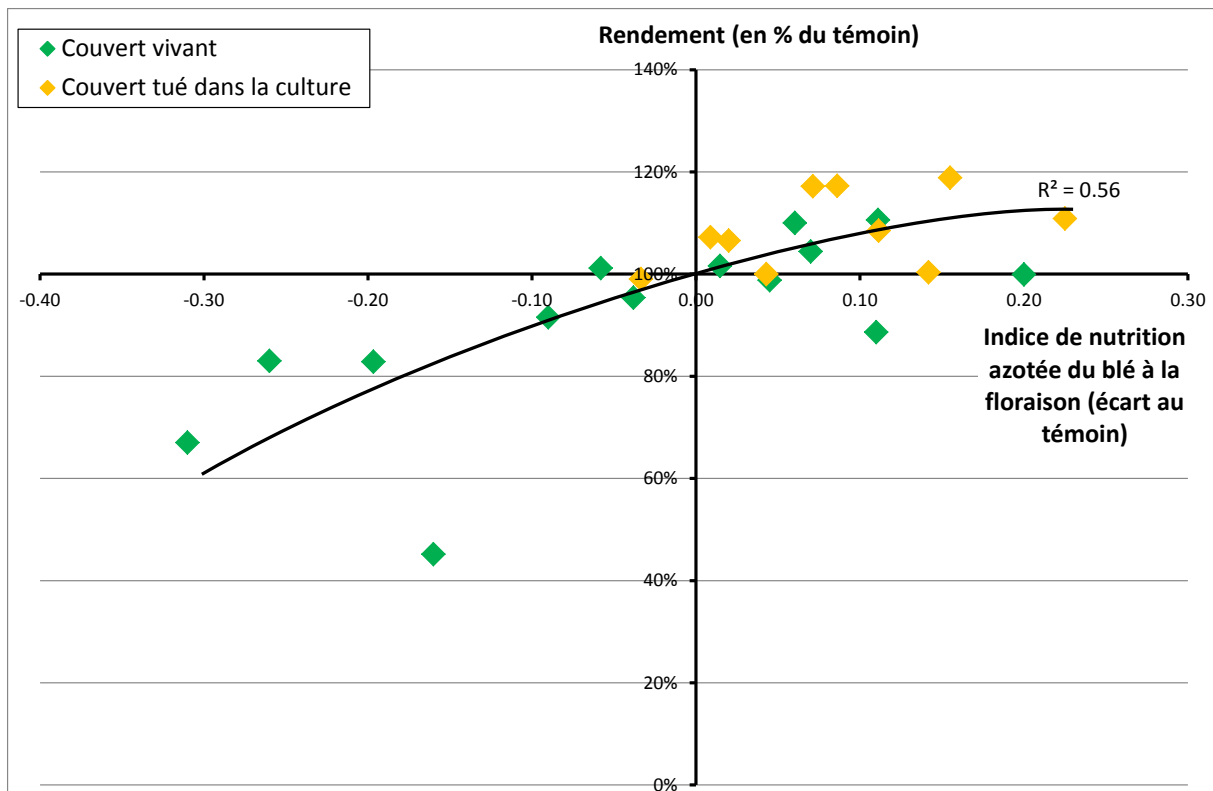


Figure 1 : Indice de nutrition azotée du blé à la floraison et rendement obtenus dans 9 essais récoltés de 2009 à 2017 en présence d'un couvert permanent, par rapport aux témoins (blé sans couvert permanent). L'INN des témoins sans couverts était de 0.6 à 0.7 en sous-fertilisation (« X-40 ») et de 0.7 à 1.1 en situation fertilisée normale (« X »).

On craint souvent en présence d'un couvert permanent une compétition pour l'eau. L'analyse des composantes de rendement tempère cette appréciation avec une hausse des PMG en présence de couverts permanents. Les essais récoltés en 2013, 2014 et 2016 ont bénéficié de conditions de fin de cycle du blé favorables en termes de pluviométrie et de jours échaudants. Cela a été différent en 2015 et en 2017. Par exemple, sur l'essai récolté à Boigneville en 2015, les couverts n'ont pénalisé ni le rendement, ni le PMG du blé. L'humidité du sol y a été suivie à l'aide de tensiomètres sur deux profondeurs (30 et 60 cm). A l'aide d'une formule validée dans le même type de sol, le déficit hydrique du sol a été calculé et ne montre aucune différence significative quelle que soit la date (Labreuche et al., 2015). Cela a été confirmé à St Hilaire en Woèvre en 2017 ainsi qu'à Boigneville en 2016 (mars et avril secs).

La bibliographie montre qu'un couvert peut augmenter la transpiration d'eau par la canopée (Shili-Touzy *et al.*, 2009). Mais l'eau ne représente pas forcément le facteur limitant la production du blé tendre d'hiver malgré la présence de couverts développés dans le blé pour les résultats obtenus par Shili-Touzy (2009) et Carof *et al.* (2007b). Dans les essais cités précédemment (Boigneville 2015 et 2016), les couverts ont été correctement régulés et la biomasse du couvert ne représentait qu'environ 5% de celle du blé au stade floraison du blé. D'autres phénomènes peuvent par ailleurs compenser une augmentation de la transpiration d'eau : réduction de l'évaporation de l'eau du sol grâce au mulch créé par le couvert permanent (Shili-Touzy *et al.*, 2009), réduction du ruissellement grâce à une amélioration de la structure du sol en surface (Hall et al., 1984). La bibliographie mentionne même un phénomène d'« ascenseur hydraulique » qui augmenterait la quantité d'eau utilisable par la culture de rente (Prieto *et al.*, 2012 ; Corak et al., 1987 ; Caldwell *et al.*, 1998). Ce phénomène correspond à une remontée nocturne d'eau par les racines du couvert, les racines déchargeant de l'eau prélevée en profondeur par un mouvement passif vers des

couches du sol de potentiel hydrique plus faible, jusqu'à des quantités correspondant à 30 % de l'évapotranspiration journalière.

La variabilité des impacts sur les composantes de rendement (tableaux 2 et 3) s'explique en partie par le manque de précision de certains essais. Cela semble lié à une relative hétérogénéité spatiale de la culture de blé (implanté en semis direct et parfois touché par la présence de campagnols). Le couvert permanent est également fréquemment hétérogène, ce qui peut avoir un impact indirect sur la culture de blé. Cela est compensé dans notre synthèse par un nombre assez élevé de comparaisons (17 essais et 50 comparaisons).

Cette variabilité de l'impact des couverts est aussi à mettre en relation avec la cinétique de croissance du couvert, que ce soit en automne avant le semis du blé ou pendant le cycle cultural du blé (tableau 3). Les couverts vivants sur l'intégralité du cycle du blé et fortement développés au printemps dans le blé ont montré un impact négatif sur le rendement du blé (figure 2). C'est ce qui ressort de notre jeu de données, avec une inflexion des rendements à partir d'une biomasse d'environ 1 t_{MS}/ha à la floraison du blé (69% des rendements obtenus par les témoins en moyenne). Un couvert dépassant cette valeur exercerait une compétition sur le blé à une période où ce dernier a de gros besoins en eau, azote et rayonnement (montaison, fécondation et remplissage du grain). La compétition pour l'azote serait le principal levier de compétition puisque les fortes chutes de rendement sont corrélées aux fortes chutes d'INN floraison (figure 1). Lorsque le couvert reste vivant tout en étant correctement régulé au printemps (moins de 1 t_{MS}/ha sur la figure 2), il permet un gain moyen de rendement de 5% (tableau 3). Ce gain est assez proche de celui obtenu avec des couverts tués dans le blé (+8%).

La bibliographie confirme que les pertes de rendement recensées avec couvert permanent sont souvent dues à un développement trop important du couvert. La régulation du couvert semble être la solution pour pallier ce risque. Lorsqu'elle est mise en place, le rendement subit une plus faible diminution du rendement, voire une amélioration. Ainsi, Carof *et al.* (2007a) montrent que moins le couvert est développé à la floraison du blé (dans une fourchette de 0.5 à 5.5 t_{MS}/ha), moins la pénalité de rendement est élevée par rapport au témoin sans couvert.

Un autre élément de la cinétique de croissance du couvert qui peut expliquer en partie le rendement du blé est sa biomasse produite en automne. L'indicateur retenu dans la synthèse a été la biomasse aérienne du couvert la plus élevée entre celle mesurée avant le semis du blé et celle mesurée en sortie d'hiver. Dans le cas de couverts tués dans le blé, pour des biomasses automnales comprises entre 0 et 2 t_{MS}/ha (0 à 50 kgN/ha absorbés), le rendement moyen du blé est de 102% des témoins (tableau 3). Pour des biomasses comprises entre 2.0 et 5.5 t_{MS}/ha (50 à 125 kgN/ha), le rendement moyen du blé est de 108% des témoins. Dans le cas de couverts restés vivants dans le blé et dont la biomasse faisait moins de 1 t_{MS}/ha à la floraison du blé, le rendement moyen obtenu est de 101 % pour les petits couverts en automne et de 105% pour les plus gros.

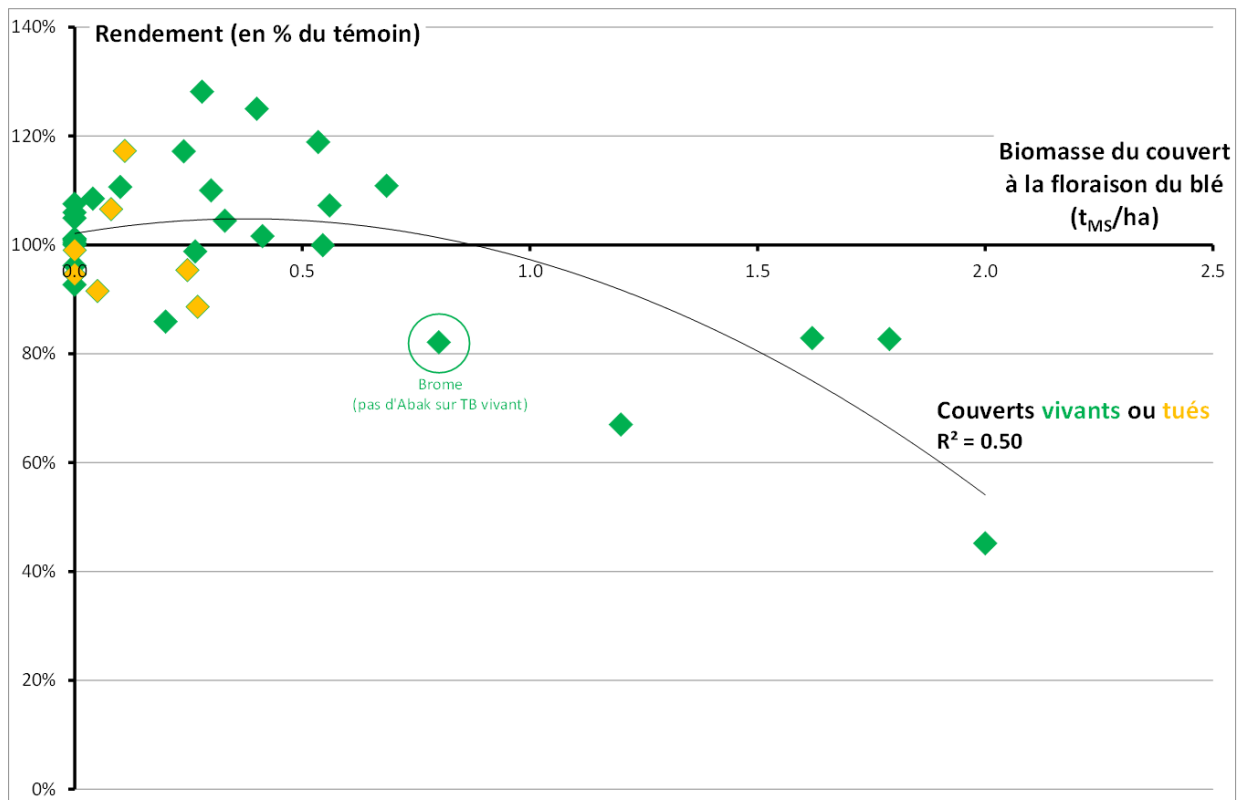


Figure 2 : Impact des couverts sur le rendement du blé selon la biomasse du couvert à la floraison du blé. Résultats sur 15 essais récoltés de 2009 à 2017. Témoin = blé sans couvert permanent. Le point situé à 0.8 t_{MS}/ha pour un rendement de 82% des témoins correspond à un essai à la Jaillière en 2017 dans lequel le blé a été concurrencé par une forte infestation de brome, cette adventice ne pouvant être détruite sans tuer le trèfle.

La bibliographie montre que les légumineuses associées à des graminées peuvent fixer de grandes quantités d'azote, les graminées étant plus efficaces pour prélever l'azote minéral du sol forçant les légumineuses à privilégier la fixation symbiotique d'azote. Les légumineuses associées peuvent avoir un impact sur la nutrition azotée des graminées de différentes manières :

- La rhizodéposition correspond à la libération d'azote dans le sol par les racines due principalement à la décomposition des racines et des nodules qui se renouvellent (Fustec et al., 2009). Cet azote alors en solution, peut être capté par les racines de la culture associée à la légumineuse. Ce transfert entre le couvert et la culture est bien supérieur entre espèces pérennes qu'entre annuelles : Høgh-Jensen et Schjoerring (2000) estiment que 45 à 75 kg N/ha/an sont échangés entre du trèfle blanc et du ray grass. Fustec et al. (2012) montrent au contraire que les transferts d'azote entre annuelles (pois et blé) sont d'une part négligeables et d'autre part non significativement différents entre ceux du pois au blé et ceux du blé au pois.
- Il y a libération d'azote dans le sol suite à la défoliation partielle du couvert ainsi qu'à mort d'une partie de ses racines (Trannin et al., 2000 ; Louarn *et al.*, 2015). Dans des prairies temporaires, Louarn *et al.* (2015) montrent que ce sont les variations saisonnières du nombre de phytomères de trèfle blanc qui expliquent la disponibilité d'une partie de l'azote du trèfle pour la graminée associée dans les semaines qui suivent. Dans le cas de couverts permanents sous blé, la régression des parties aériennes de légumineuse entre l'automne et le printemps est susceptible de contribuer à libérer de l'azote disponible pour le blé associé.
- Une graminée étant plus performante pour capter l'azote du sol que les couverts de légumineuses, la compétition pour l'azote ne se manifeste que rarement d'après Carof *et al.* (2007b) et Hiltbrunner *et al.* (2007). Les légumineuses sont toutefois

enclines à prélever l'azote dans le sol lorsqu'il est disponible (Hartwig et Ammon, 2002). Une compétition peut donc s'établir.

Quelques enseignements peuvent donc être tirés :

- Les couverts ne seront bénéfiques à une culture de blé que s'ils sont bien développés lors du semis de la culture. Ils doivent donc être semés nettement avant le semis de blé (dès la récolte du précédent dans le cas d'espèces annuelles vigoureuses ; dans le précédent pour des espèces pérennes plus longues à s'installer). Des petits couverts peuvent éventuellement améliorer le rendement s'ils lèvent d'autres facteurs limitants que l'azote (ex : asphyxie racinaire en sol hydromorphe).
- La régulation du couvert est primordiale, en particulier dès la sortie d'hiver. Elle limitera la compétition du couvert sur le blé et permettra la régression des parties aériennes du couvert, ce qui est à même de favoriser la minéralisation d'une partie de l'azote contenu dans le couvert.

2. IMPACT DES COUVERTS SUR LA REPONSE DU BLE A LA DOSE D'AZOTE

Afin d'évaluer comment la présence d'un couvert permanent impacte la réponse du blé aux apports d'azote, des courbes de réponse à l'azote ont été réalisées. Les résultats ont été modélisés en quadratique plateau (tableau 4). Le rendement atteint au niveau du plateau et la dose d'azote optimale ont été comparés entre les modalités avec et sans couvert (comparaison des courbes en modèles emboîtés). Pour l'essai de Poix 2017, deux références ont été retenues : le sol nu et les repousses de colza. Sur les 15 comparaisons réalisées, seules trois montrent un décalage de la dose d'azote optimale entre une céréale seule et une céréale sur couvert permanent, mort ou vivant (tableau 4). Une montre une baisse de la dose d'azote optimale (Brives 2013) et deux une augmentation (Dosnon 2017). En revanche, le rendement obtenu au niveau du plateau est significativement différent dans 8 cas sur 15. Dans la moitié des cas, ce rendement a été augmenté (figure 3), dans l'autre moitié il a été réduit.

Ces résultats confirment la diversité des réponses du rendement du blé à la présence d'un couvert permanent, à dose d'azote identique, observée tableau 3. Il semble difficile de prédire à l'avance dans quelle mesure le potentiel du blé sera modifié.

On aurait pu s'attendre à observer fréquemment une réduction des doses d'azote optimales en présence d'un couvert permanent de légumineuse, en lien avec de plus fortes fournitures d'azote par le sol. L'effet des couverts sur le potentiel de rendement des cultures est souvent concomitant avec un meilleur indice de nutrition azotée du blé à la floraison (figure 1). L'augmentation des besoins du blé (en lien avec son potentiel de rendement) est alors peut être compensée par une hausse des fournitures d'azote par le sol. A l'instar de ce qui est observé sur colza en présence de plantes compagnes, des facteurs limitants du rendement du colza autres que l'azote pourraient être levés, comme l'enracinement de la culture (Cadoux et al., 2015).

Par ailleurs, ces courbes de réponse à l'azote ont été réalisées sur des essais où les couverts ont souvent eu un développement faible à moyen pendant l'interculture précédant le blé. La biomasse du couvert en automne n'a dépassé les 2 t_{MS}/ha que sur trèfle blanc dans l'essai de Dosnon 2016. Les résultats obtenus sur cet essai ont pu être bouleversés par la climatologie très atypique du printemps 2016 dans le bassin parisien.

Enfin, la forte représentation des sols de craie (3 essais sur 5) pose question car l'effet des couverts d'interculture sur la réponse à la fertilisation azotée semble y être différent d'autres sols. Des essais réalisés en sol de craie comme à Thibie (51) ou Luyères (10) ont ainsi plus souvent montré un dé plafonnement du rendement qu'un décalage de l'optimum de fertilisation azotée, au contraire d'essais présents sur d'autres types de sol (Briffaux, 2009 ; Vegellia, 2012).

En l'état actuel des choses, rien ne démontre la pertinence de réduction des apports d'azote en présence d'un couvert permanent sur blé, au travers d'une estimation d'augmentation des fournitures d'azote par exemple. Il existe trop d'interactions possibles entre le couvert et la culture pour prédire avec précision une évolution des termes de la méthode du bilan. Il semble donc plus raisonnable de ne pas prendre en compte la présence du couvert dans les calculs de dose et de diagnostiquer l'état de nutrition azotée de la culture pendant sa montaison pour optimiser les apports d'azote, ce qui permettra d'intégrer tous les aléas inhérents à la croissance du blé et à sa nutrition azotée dont la présence d'un couvert permanent est un élément parmi d'autres.

		Rendement plateau (p)		Pente (b)	Dose d'azote optimale (x0)	
		q/ha	Stats (p value)		kgN/ha	Stats (p value)
Brives 2013 BTH	Chisel	85.3	Référence	7.4 e-4	272.0	Référence
	SCV avec luzerne	84.8	NS (0.77)	9.2 e-4	213.0	*** (0.0096)
La Jaillière 2014 BTH	Blé solo	75.7	Référence	7.50E-04	284.6	Référence
	Blé sur trèfles annuels	83.3	NS (0.50)	8.20E-04	284.0	NS (0.99)
Dosnon 2016 BTH	Blé solo	70.1	Référence	10.6 e-4	175.8	Référence
	LUZERNE Détruite	70.3	NS (0.92)	9.1 e-4	185.5	NS (0.82)
	LUZERNE Vivante	70.2	NS (0.96)	10.5 e-4	171.7	NS (0.93)
	TREFLE BLANC Détruit	69.5	NS (0.75)	10.6 e-4	162.8	NS (0.80)
	TREFLE BLANC Vivant	69.9	NS (0.91)	9.8 e-4	182.7	NS (0.89)
	LOTIER Détruit	68.2	NS (0.36)	9.9 e-4	176.7	NS (0.99)
	LOTIER Vivant	66.2	* (0.08)	8.8 e-4	189.9	NS (0.76)
Poix 2017 BTH	Blé solo	101.0	Référence	8.6 e-4	241.1	Référence
	REPOUSSES colza	94.9	** (0.024)	10.1 e-4	215.2	NS (0.50)
	TREFLE détruit en février	90.2	*** (0.002)	11.9 e-4	207.0	NS (0.41)
	REPOUSSES colza	94.9	Référence	8.6 e-4	215.2	Référence
	TREFLE détruit en février	90.2	** (0.01)	11.9 e-4	207.0	NS (0.69)
Dosnon 2017 OP	OP solo	76.2	Référence	14.7 e-4	136.4	Référence
	TB Détruit décembre	85.2	*** (0.00097)	11.4 e-4	149.2	NS (0.48)
	TB Détruit avril	81.1	*** (0.00039)	12.9 e-4	167.9	** (0.01)
	LOTIER Détruit décembre	88.0	*** (0.0012)	17.8 e-4	119.6	NS (0.22)
	LOTIER Détruit avril	83.1	*** (0.0004)	11.4 e-4	162.7	* (0.08)

Tableau 4 : Rendements et doses d'azote optimaux sur 5 essais courbes de réponse à l'azote récoltés de 2013 à 2017. Ajustement des courbes de réponse en quadratique plateau. Comparaison des courbes en modèles emboîtés. NS : Différence Non Significative ; * Différence significative à 10% ; ** différence significative à 5% ; *** différence significative à 1%.

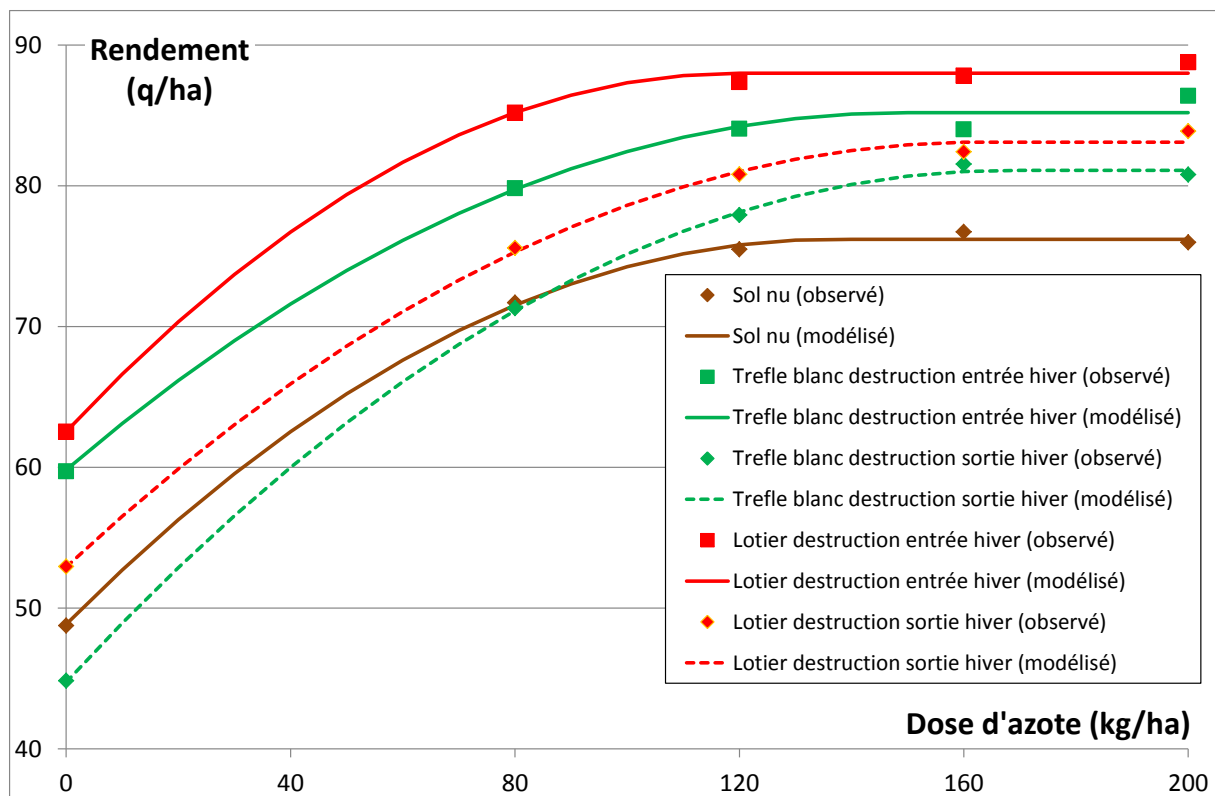


Figure 3 : Impact de la dose d'azote et de la gestion d'un couvert sur le rendement d'une orge de printemps. Essai réalisé à Dosnon (10) en partenariat avec le CETA de Romilly en 2017. Les points correspondent aux rendements mesurés dans l'essai et les courbes au modèle en quadratique plateau.

3. IMPACT DES COUVERTS PERMANENTS SUR LES RELIQUATS D'AZOTE MINERAL DU SOL

L'impact des couverts permanents légumineuses sur le reliquat d'azote minéral du sol a été mesuré à plusieurs dates dans les essais et notamment en automne (du semis du blé au début du drainage) et aussi en sortie d'hiver. Pour la première période, nous avons retenu les essais en blé et orge de printemps. Pour la seconde période, nous n'avons retenu sur les essais sous blé dans la mesure où la comparaison avec des essais sous orge de printemps ne peut se faire, le blé ayant déjà absorbé de l'azote minéral en sortie d'hiver au contraire de l'orge de printemps.

En automne, on peut observer sur la figure 4 que la présence d'un couvert permanent réduit la quantité d'azote minéral dans le sol (écart très significativement différent). Lorsque le couvert est comparé non pas à un sol nu mais un couvert « piège à nitrate » non légumineuse (repousses de colza le plus souvent), les écarts sont plus resserrés (points verts clairs sur la figure 4). Cependant, les couverts permanents de légumineuses n'augmentent pas le reliquat d'azote minéral en automne par rapport aux repousses de colza.

En sortie d'hiver, les écarts de reliquat d'azote minéral du sol sont plus resserrés entre un couvert permanent et le témoin (figure 5).

Deux essais « pratiques culturales et qualité des eaux » sont en place en présence d'un couvert permanent de trèfle blanc, en comparaison à un témoin sans trèfle. Le premier essai est en place à la Jaillière (44) et mesure la qualité des eaux de drainage et de ruissellement. Les données acquises l'hiver 2016/2017 sont en cours d'analyse au moment de la rédaction de cet article. Le second essai se situe à Poix (51) et est conduit par l'AREP. Il n'y a pas eu de lixiviation dans les cases lysimétriques l'hiver sec 2016/2017.

Il est donc encore trop tôt pour conclure quant à l'effet de couverts permanents légumineuses sur le risque de fuites de nitrate par lixiviation. Les premiers éléments acquis

au niveau des reliquats d'azote minéral du sol en entrée et sortie d'hiver semblent cependant indiquer que des légumineuses pérennes présentes dans des rotations céréalières ont une certaine capacité d'absorption de l'azote minéral présent dans le sol et jouent le rôle de piège à nitrate. Cela a déjà été montré dans le cas de cultures intermédiaires avec des espèces annuelles à cycle court de 3 mois environ (Cohan et al., 2014). Justes et al. (2012) ont chiffré le coefficient d'abattement de lixiviation du nitrate par rapport à un témoin (sol nu) entre 30 et 90% pour les couverts non légumineuses, entre 0 et 40% pour des couverts de légumineuses annuelles et entre 20 et 60% pour des associations de ces deux types de plantes. Cet effet piège à nitrate semble plus élevé dans le cas d'espèces fourragères et pérennes installées sur de longues durées (prairies, luzernières...). Cela est notamment reconnu dans le cas de luzernières qui ont montré de réelles capacités d'absorption de l'azote minéral du sol (Schneider et Huyghe, 2015), même en cas d'apport de lisier (Thiébeau et al., 2004). Dans le cas de prairies temporaires ray grass + trèfle blanc, les fuites de nitrate ne sont pas plus élevées que sous des prairies de ray grass seul (Vertés et al., 2010).

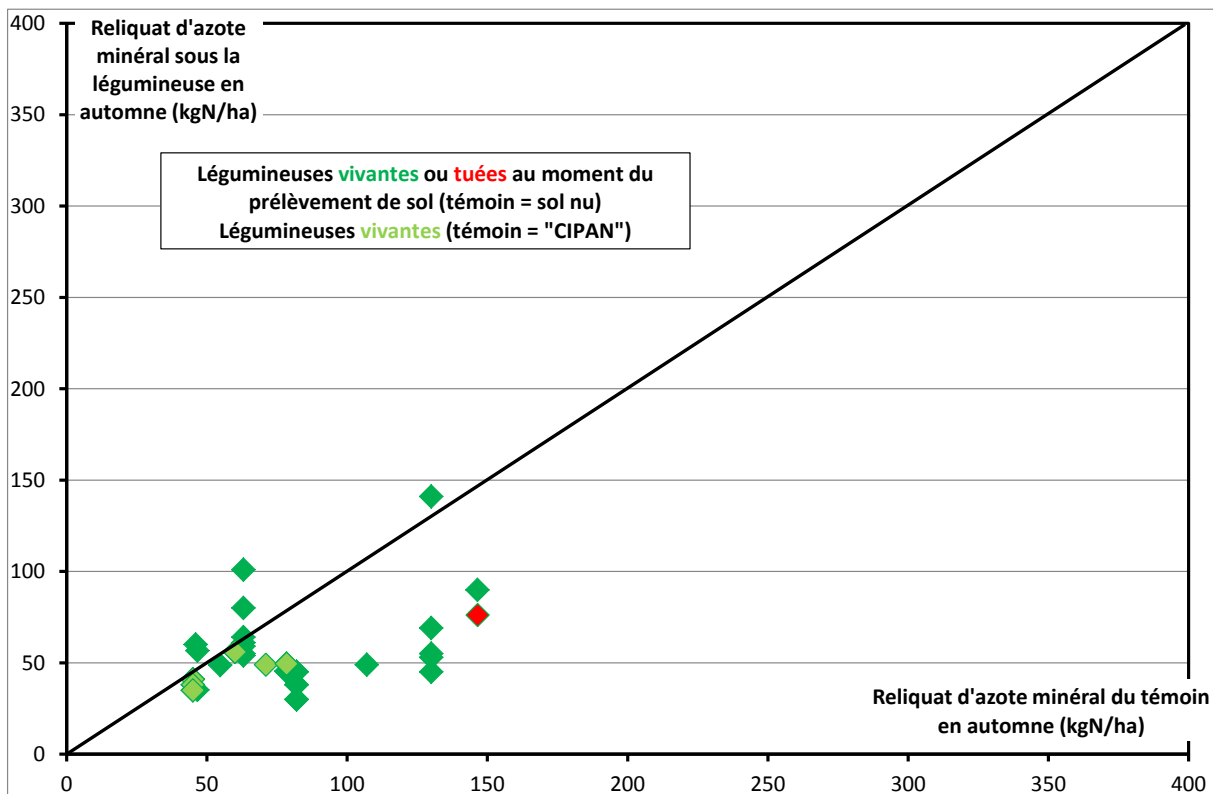


Figure 4 : Impact des couverts permanents sur le reliquat d'azote minéral du sol en automne (du semis du blé au début du drainage). Résultats sur 12 essais récoltés de 2009 à 2017 (9 essais sur blé et 3 sur orge de printemps). Toutes situations confondues (38 comparaisons), le reliquat est significativement plus faible sous le couvert permanent : 54 kgN/ha contre 78 (p -value = 1.8×10^{-5}). Si le témoin est un sol nu (25 comparaisons), le reliquat est significativement plus faible sous le couvert permanent : 59 kgN/ha contre 92 (p -value = 2.5×10^{-5}). Si le témoin est un couvert non légumineuse (13 comparaisons), le reliquat est plus faible sous le couvert permanent : 45 kgN/ha contre 50 (p -value = 0.07).

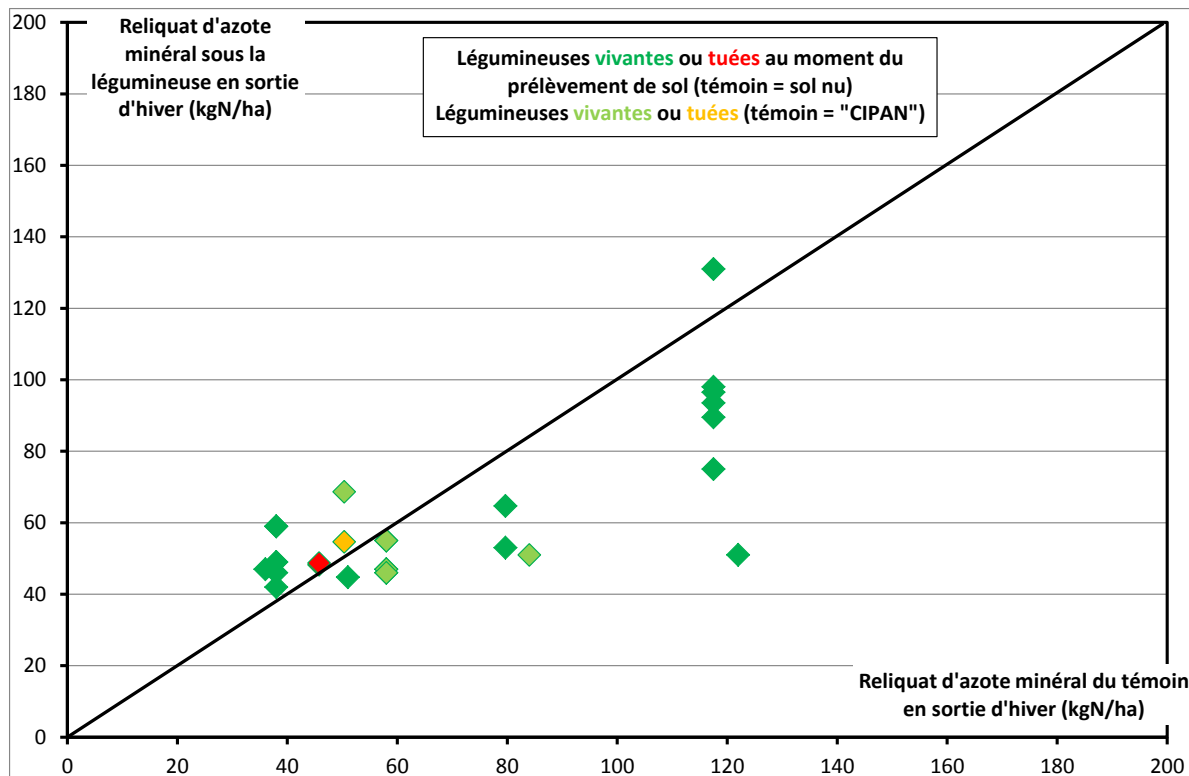


Figure 5 : Impact des couverts permanents sur le reliquat d'azote minéral du sol en sortie d'hiver. Résultats sur 9 essais sur blé récoltés de 2009 à 2017. Toutes situations confondues (35 comparaisons), le reliquat est légèrement plus faible sous le couvert permanent : 61 kgN/ha contre 69 (p-value = 0.07).

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Dix-sept essais ont comparé à un témoin une ou plusieurs modalités avec un couvert permanent tué ou gardé vivant dans une culture de blé. Au total, 50 comparaisons ont eu lieu. Des courbes de réponse à l'azote ont également été réalisées sur 5 de ces essais. Il ressort que des bénéfices peuvent être tirés de la présence de ces couverts sur le rendement du blé à condition qu'ils soient bien développés lors du semis de la culture. Ils doivent donc être semés nettement avant le semis de blé (dès la récolte du précédent et si possible dans la culture précédente). Garder le couvert vivant dans le blé est possible mais nécessite une grande technicité. La régulation du couvert est primordiale, notamment dès la sortie d'hiver et au printemps en gardant la biomasse du couvert à un niveau modéré. Le contrôle du développement du couvert peut aussi être nécessaire lors d'automne doux avec des espèces non dormantes comme le trèfle blanc. La destruction du couvert dans le blé donne aussi de bons résultats et offre une certaine sécurité en limitant le risque de compétition du couvert sur le blé. Dans ce cas, il est recommandé de détruire le couvert au plus tard en sortie d'hiver.

L'effet des couverts sur le potentiel de rendement des cultures est souvent concomitant avec un meilleur indice de nutrition azotée du blé à la floraison. Cependant, cinq essais avec des courbes de réponse à l'azote montrent que les situations où l'optimum de fertilisation azotée est décalé en présence d'un couvert permanent sont finalement peu nombreuses. Le rendement optimal est en revanche plus fréquemment impacté dans ces courbes de réponse. Avec les données actuelles qui restent à compléter, il ressort qu'il n'est pas envisageable de modifier la stratégie de fertilisation azotée pour s'adapter à la présence d'un couvert permanent, tant les interactions entre le couvert et la culture peuvent être variables. Un diagnostic de l'état de nutrition azotée de la culture pendant sa montaison est le seul moyen utilisable à l'heure actuelle.

Les couverts permanents de légumineuse ont montré une certaine capacité d'absorption de l'azote minéral présent dans le sol en automne. Des travaux sont en cours pour mesurer le risque de fuites de nitrate par lixiviation sous ce type de couvert.

Différents volets techniques restent à travailler quant à l'intégration de couverts permanents dans les systèmes de culture. Les techniques de régulation des principales espèces de couverts sont importantes à travailler, notamment celles qui ne feraient pas appel aux herbicides (régulation mécanique en interculture voire dans la culture ; régulation par le pouvoir compétitif des cultures...). La lutte contre les ravageurs, les campagnols en particulier, est un point faible associé à cette technique de semis direct avec plantes de couverture qu'il est important de travailler. Une quantification des bénéfices environnementaux de ces couverts est également à réaliser (stockage de carbone, transferts de polluants, biodiversité, compétition sur les adventices...). Enfin, les références actuelles permettent peu à peu de cerner dans quelles situations le couvert permanent est bénéfique ou au contraire devient néfaste. Elles devraient permettre de formaliser des règles aidant à décider quand il faut arrêter la croissance du couvert dans la rotation culturale.

REMERCIEMENTS

Les auteurs de cet article tiennent à remercier Messieurs Charpentier, Lemey, Lhermey, Déon, Appert et Joly pour l'accueil d'expérimentations ou suivis sur leurs exploitations.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Briffaux G., 2009. Limiter le lessivage des nitrates. Essai de longue durée. Site de THIBIE (Marne). Résultats acquis de 1991 à 2008. Compte-rendu AREP. 115 p.
- Cadoux S., Sauzet G., Valantin-Morison M., Pontet C., Champolivier L., Robert C., Lieven J., Flénet F., Mangenot O., Fauvin P., Landé N. 2015. Intercropping frost-sensitive legume crops with winter oilseed rape reduces weed competition, insect damage, and improves nitrogen use efficiency. *OCL* 2015, 22(3) D302.
- Caldwell, M. M., T. E. Dawson, et J. H. Richards. (1998). Hydraulic lift: consequences of water efflux from the roots of plants. *Oecologia* 113, 151–161.
- Carof, M. (2006). Fonctionnement de peuplements en semis direct associant du blé tendre d'hiver (*Triticum aestivum* L.) à différentes plantes de couverture en climat tempéré. Thèse INAPG (AgroParisTech).
- Carof, M., S. De Tourdonnet, P. Saulas, D. Floch, et J. Roger-Estrade. (2007a). Undersowing wheat with different living mulches in a no-till system. I. Yield analysis. *Agronomy for Sustainable Development* 27, 347-356.
- Carof, M., S. De Tourdonnet, P. Saulas, D. Floch, et J. Roger-Estrade. (2007b). Undersowing wheat with different living mulches in a no-till system. II. Competition for light and nitrogen. *Agronomy for Sustainable Development* 27, 357-365.
- Cohan J.P., Labreuche J., Bouthier A., Justes E., 2014. Leguminous cover-crops effects compared to non leguminous on nitrate leaching and nitrogen supplying to the succeeding corn and spring barley. 18th Nitrogen Workshop – Lisbon, Portugal, 30th June – 3rd July 2014.
- Corak, S. J., D. G. Blevins, et S. G. Pallardy (1987). Water Transfer in an Alfalfa/Maize Association. *Plant Physiology* 84, 582-586.
- Fustec J., Lesuffleur F., Mahieu S., Cliquet J.B. (2009). Nitrogen rhizodeposition of legumes. A review. In : *Agronomy for Sustainable Development*. INRA, EDP Sciences, pp. 57-66.
- Fustec J., Malagoli P., Siméon P., Cannavacciuolo M., Bernard L., Brauman A., Hinsinger P. 2012. Does nitrogen transfer matter in cereal-legume intercrops? Poster: Rhizosphere 3 International conference Perth, Australia, Sept 2011, 26-30

- Hartwig, N. L. et H. U. Ammon. (2002). Cover crops and living mulches. *Weed science* 50, 688–699.
- Hiltbrunner, J., P. Jeanneret, M. Liedgens, P. Stamp, et B. Streit. (2007). Response of Weed Communities to Legume Living Mulches in Winter Wheat. *Journal of Agronomy and Crop Science* 193, 93-102.
- Hogh-Jensen H. and Schjoerring J.K. (2000). Below-ground nitrogen transfer between different grassland species: Direct quantification by ^{15}N leaf feeding compared with indirect dilution of soil ^{15}N . In : *Plant Soil* 227. Springer, pp. 171–183.
- Justes E., Beaudoin N., Bertuzzi P., Charles R., Constantin J., Dürr C., Hermon C., Joannon A., Le Bas C., Mary B., Mignolet C., Montfort F., Ruiz L., Sarthou J.P., Souchère V., Tournebize J., Savini I., Réchauchère O., 2012. Réduire les fuites de nitrate au moyen de cultures intermédiaires : conséquences sur les bilans d'eau et d'azote, autres services écosystémiques. Synthèse du rapport d'étude, INRA (France), 60 p.
- Labreuche J., Sablé M., Cohan J.P., Baranger E., Légère R., Messmer Y., Jezequel S., 2015. Impact d'un couvert vivant de légumineuse sur le rendement et la nutrition azotée du blé tendre d'hiver. 12èmes Rencontres de la fertilisation raisonnée et de l'analyse COMIFER-GEMAS Lyon - 18 et 19 novembre 2015.
- Labreuche J., Edeline P., Sauzet G., 2017. Pratiques culturales : des couverts à durée indéterminée. *Perspectives Agricoles*. N° 443, pp 38-41.
- Louarn G., Pereira-Lopès E., Fustec J., Mary B., Voisin A.S., de Faccio Carvalho P.C., Gastal F. (2015). The amounts and dynamics of nitrogen transfer to grasses differ in alfalfa and white clover-based grass-legume mixtures as a result of rooting strategies and rhizodeposit quality. *Plant soil*, 389, 289-305.
- Prieto I., Armas C., Pugnaire F.I. (2012). Water release through plant roots: new insights into its consequences at the plant and ecosystem level. In : *New Phytologist* 193, pp.830-841.
- Schneider, A., and Huyghe, C. (2015). Les Légumineuses pour des systèmes agricoles et alimentaires durables. Editions Quae. 473 p.
- Shili-Touzi, I. (2009). Analyse du fonctionnement d'une association de blé d'hiver (*Triticum aestivum* L.) et d'une plante de couverture sur une échelle annuelle par modélisation et expérimentation. Thèse AgroParisTech, 147 p.
- Shili-Touzi I., De Tourdonnet S., Launay M., Dore T. (2009). Does intercropping winter wheat (*Triticum aestivum*) with red fescue (*Festuca rubra*) as a cover crop improve agronomic and environmental performance? A modeling approach. In : *Field Crops Research* 116. Elsevier, Grignon, pp. 218-229.
- Thiébeau P., Larbre D., Usunier J., Cattin G., Parnaudeau V., Justes E., 2004b. Effect of regular pig slurry spreading on the forage production of lucerne (*Medicago sativa* L.) and on soil N dynamics. *Proceedings of VIII ESA congress*, 11-15 July 2004. Copenhagen (DK), 463-464.
- Trannin W.S., Urquiaga S., Guerra G., Ibijbijen J., Cadisch G. (2000). Interspecies competition and N transfer in a tropical grass-legume mixture. In : *Biology and Fertility of Soils* 32. Springer-Verlag, Paris, pp. 441–448.
- Vegellia, 2012. Intercultures à base de légumineuses : résultats d'expérimentations 2006-2010 (Chambre d'agriculture de l'Aube-Institut Technique de la Betterave-Arvalis Institut du végétal). 30 p.
- Vertés F., Jeuffroy M.H., Justes E., Thiébau P., Corson M., 2010. Connaître et maximiser les bénéfices environnementaux liés à l'azote chez les légumineuses, à l'échelle de la culture, de la rotation et de l'exploitation. *Innovation Agronomique*, 11,25-44.