

## Association relais blé / légumineuse fourragère en système céréalier biologique : une réponse pour le contrôle des adventices et la nutrition azotée des cultures

Amossé C. <sup>1</sup>, Celette F. <sup>1</sup>, Jeuffroy M.-H. <sup>2,3</sup>, David C. <sup>1</sup>

<sup>1</sup> ISARA-Lyon, UP SCAB, 23 rue Jean Baldassini, F-69364 Lyon Cedex 07

<sup>2</sup> INRA, UMR211 Agronomie, BP01, F- 78850 Thiverval-Grignon

<sup>3</sup> AgroParisTech, UMR211 Agronomie, BP01, F-78850 Thiverval-Grignon

**Correspondance** : davidc@isara.fr

### Résumé

Les systèmes céréaliers biologiques doivent être adaptés pour faire face aux déficits d'azote et aux difficultés de maîtrise des adventices. Cela est d'autant plus vrai lorsqu'ils sont spécialisés en grandes cultures et que les légumineuses fourragères, pourtant intéressantes face à ces problématiques, sont trop peu présentes dans les rotations. Notre étude s'est intéressée à l'insertion en relais de quatre espèces de couverts de légumineuses sous couvert de blé d'hiver pour apporter une réponse conjointe à la gestion des adventices et à la nutrition azotée des cultures. Les couverts ont été maintenus après la récolte de la céréale jusqu'au semis du maïs suivant. Les performances des deux cultures de vente et des légumineuses ont été suivies ainsi que le développement des adventices et la dynamique de l'azote dans le système sol-plante. Nos résultats ont montré que la minette et le trèfle violet, qui supportaient le mieux la compétition du blé, étaient susceptibles de diminuer le taux protéique des grains (-0.3 à -0.4 %). Cependant, les légumineuses sous couvert n'interviennent pas sur le rendement du blé. Par ailleurs, les quatre espèces ont montré leur intérêt dans le contrôle des adventices, aussi bien pendant la période d'association que pendant l'interculture. Enfin, la restitution d'azote à la culture de maïs suivante a été efficace et a permis une augmentation significative de 30 % du rendement en grains.

**Mots-clés**: Association culturale, agriculture biologique, *Triticumaestivum* (L.), *Medicago*, *Trifolium*

**Abstract**: Wheat / forage legume intercropping in organic grain system: an answer to both weed and nitrogen deficiency issues

Organic grain system managers have to find solutions to nitrogen deficiency and weed infestation. It is especially true when no animals are present on the farm to justify the use of forage legumes despite their interests in the crop succession. Our study focused on the role of four legume cover crop species inserted in a succession of winter wheat and maize on both problems. This insertion consisted in relay-intercropping the legumes under the canopy of wheat. Cover crops were maintained on the field after the harvest of the cereal until the sowing of the subsequent maize crop. The performance of the three crops of the succession was monitored as well as weed development and nitrogen dynamic in the soil-plant system. On the one hand, our results showed that black medic and red clover, that supported the best the competition of wheat, were likely to decrease its grain protein content at harvest (-0.3 to -0.4 %). On the other hand, the four species did not decrease intercropped wheat grain yield. They were able to control weed infestation during the intercropping period and between the two cash crops. Finally, nitrogen restitution to the subsequent maize crop was efficient and allowed a significant 30 % increase of maize grain yield.

**Keywords**: Intercropping, organic farming, *Triticumaestivum* (L.), *Medicago*, *Trifolium*

## Introduction

Dans un contexte d'augmentation du prix des engrais organiques, l'insertion de couverts de légumineuses dans les rotations est préconisée pour faire face aux déficits d'azote observés dans les systèmes de grandes cultures biologiques sans élevage (Robson *et al.*, 2002; Mazzoncini *et al.*, 2004; Antichi *et al.*, 2008; Casagrande *et al.*, 2009). La fixation symbiotique de l'azote atmosphérique, assurée par les légumineuses, et sa restitution sous forme assimilable par les grandes cultures (Askegaard et Eriksen, 2007; Fustec *et al.*, 2010) constituent une alternative agroécologique à moindre coût.

Par ailleurs, le contrôle des adventices est un enjeu fort en agriculture biologique du fait de l'interdiction des herbicides de synthèse (Bàrberi, 2002; Turner *et al.*, 2007). Bien que les techniques de contrôle alternatives au désherbage chimique s'améliorent (Bond et Grundy, 2001; Wei *et al.*, 2010), le risque d'infestation est particulièrement important dans les exploitations de grande culture sans élevage où les rotations peuvent être courtes et où les prairies temporaires, compétitrices face aux adventices, sont peu présentes en l'absence d'animaux (David *et al.*, 2010).

Aussi, l'implantation de légumineuses sur plusieurs années s'envisage difficilement du fait du fort différentiel de prix avec certaines grandes cultures biologiques plus rémunératrices (maïs, blé). Pour éviter la substitution d'une culture de vente par une culture sans valorisation économique directe, la culture simultanée d'un couvert de légumineuse avec les cultures céréalières de la rotation peut s'envisager. Cette pratique doit permettre d'augmenter le temps de présence de la légumineuse sur la parcelle, comparativement à une interculture d'automne, tout en permettant une couverture rapide du sol dès la récolte de la culture de vente. L'allongement du temps de présence de la légumineuse sur la parcelle par rapport à une interculture doit lui assurer un développement végétatif plus important, ce qui devrait accroître sa capacité à restituer de l'azote (Olesen *et al.*, 2009). Après enfouissement, ce couvert participe à l'enrichissement du système sol-plante. La couverture du sol immédiatement après la récolte de la culture de vente doit permettre de limiter le développement des adventices par compétition pour la ressource lumineuse notamment (Teasdale *et al.*, 2007). L'utilisation de couverts de légumineuses génère par ailleurs d'autres services écosystémiques, tels que l'augmentation de la biodiversité et la protection du sol contre l'érosion (Hartwig et Ammon, 2002; Sheaffer et Seguin, 2003).

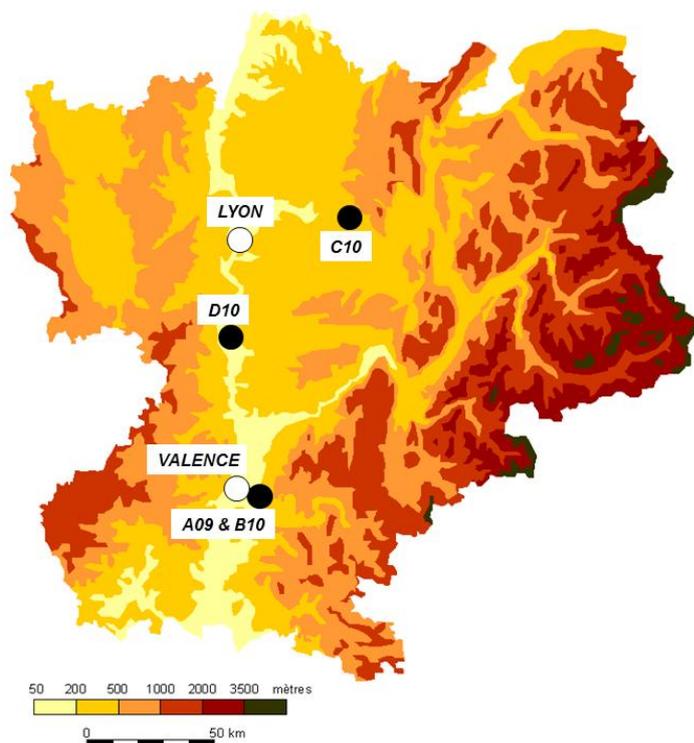
La croissance simultanée d'un couvert de légumineuse et d'une culture céréalière peut potentiellement générer une compétition sur les ressources trophiques (minérales et lumineuse) au détriment de la céréale. Des diminutions fortes (60%) du rendement du blé ont pu être observées lorsqu'il est semé dans un couvert vivant de légumineuses (Carofet *et al.*, 2007 ; Hiltbrunner *et al.*, 2007). Dans le cas d'une association entre une céréale et un couvert de légumineuse, la dominance de la céréale est essentielle à la limitation de la compétition pour les ressources trophiques afin d'éviter des pertes de rendement et de qualité (Andersen *et al.*, 2007 ; Shili-Touzi *et al.*, 2010). L'implantation de la céréale préalablement à celle du couvert de légumineuse associé doit permettre à la céréale de bénéficier d'un meilleur accès aux ressources trophiques. Cette pratique, nommée association relais, du fait du décalage de la date de semis du couvert associé, doit permettre (i) un développement préalable suffisant de la céréale pour limiter le risque de compétition avec le couvert et les pertes de rendement associées, mais (ii) sans empêcher l'émergence et l'implantation de la légumineuse sous couvert au risque de ne pas bénéficier pleinement des avantages agronomiques escomptés.

Peu d'études se sont intéressées aux bénéfices des couverts de légumineuses associés à une céréale en relais sur (i) la compétition inter-spécifique durant la phase d'association, (ii) l'enrichissement en azote du système sol-plante et (iii) le contrôle des adventices, notamment en agriculture biologique (Hartl, 1989; Becker et Leithold, 2008). La plupart des études sur les associations relais entre une céréale et un couvert de légumineuse ont été menées en conditions d'agriculture conventionnelle (Vyn *et al.*, 2000 ; Thiessen Martens *et al.*, 2001; Mutch *et al.*, 2003; Blaser *et al.*, 2006 ; Blackshaw *et al.*, 2010 ; Henry *et al.*, 2010 ; Bergkvist *et al.*, 2011; Blaser *et al.*, 2011). Les conditions de production biologique présentent des particularités qui peuvent faire évoluer les résultats comparativement à ceux

observés jusque-là en agriculture conventionnelle : déficits d'azote très fréquents, fort risque d'infestation par les adventices. D'autre part, l'effet d'une même espèce de couvert de légumineuse associée en relais à un blé sur les performances finales de la culture suivante peut varier selon les conditions, comme l'illustrent les études d'Hesterman *et al.* (1992) et de Bruulsema et Christie (1987) avec le trèfle violet et la luzerne. L'objectif de cette étude a donc été de comparer l'effet du semis de quatre espèces de légumineuses fourragères pérennes sous couvert de blé d'hiver (i) sur les performances finales du blé, (ii) sur la maîtrise des adventices durant l'association et l'interculture, et (iii) sur les capacités d'enrichissement, de préservation et de restitution d'azote au système sol-plante, des couverts de légumineuses durant la succession d'un blé d'hiver et d'un maïs.

## 1. Matériel et méthodes

Quatre parcelles expérimentales ont été suivies durant les saisons culturales 2008-2010 (parcelle A09) et 2009-2011 (parcelles B10, C10 et D10) incluant la culture successive de blé d'hiver et de maïs. Ces parcelles étaient réparties dans la région Rhône-Alpes (Figure 1) au sein d'exploitations agricoles biologiques sans élevage, spécialisées en grandes cultures. La répartition des parcelles a permis de tester les associations relais dans des conditions variées de climat (méditerranéen à continental) et de sol (sablo-limoneux [A09 et B10], argilo-limoneux [C10] et limono-argilo-sableux [D10]).



**Figure 1 :** Répartition géographique des quatre essais suivis en région Rhône-Alpes en 2008-2010 (A09) ou 2009-2011 (B10, C10, D10).

Sur l'ensemble des quatre parcelles, un blé d'hiver (*Triticumaestivum* L. cv. Lona) a été semé, suite à une culture de soja (*Glycine max* (L.) Merr.), avec une densité de semis de 485 graines m<sup>-2</sup> (200 kg ha<sup>-1</sup>). Les dates de semis se sont échelonnées entre le 26 octobre et le 26 novembre. La variété choisie est connue pour sa forte teneur en protéines (blé améliorant, *hard wheat*), et son adaptation à des conditions nutritives limitantes.

Une espèce de légumineuse à vocation fourragère a été associée au blé d'hiver, choisie parmi quatre espèces comparées : la minette (*Medicagolupulina* L. cv. Virgo Pajberg), la luzerne (*Medicagosativa* L.

cv. Timbale), le trèfle violet (*Trifolium pratense* L. cv. Formica) et le trèfle blanc (*Trifolium repens* L. cv. Aberdai). Ces quatre traitements ont été comparés à une culture de blé pur (Témoin). Les quatre espèces ont été semées à la volée, à une densité de 800 graines m<sup>-2</sup>, au stade plein-tallage du blé, à la fin du mois de mars. Les couverts de légumineuses ont été maintenus sur la parcelle après la récolte du blé, jusqu'à la fin de l'hiver suivant où ils ont été détruits par labour, neuf à douze semaines avant le semis de la culture de maïs suivante. Sur les quatre parcelles, la culture suivante a été un maïs implanté en avril.

Le dernier désherbage mécanique du blé a été réalisé sur chaque parcelle expérimentale, dont le traitement témoin, immédiatement ou un jour après le semis des légumineuses. Ce passage de herse-étrille a aussi servi à enfouir les graines de légumineuses dans les premiers centimètres de sol. Aucune fertilisation azotée organique n'a été réalisée sur le blé à l'automne ou au printemps afin de mettre en avant l'effet des couverts sur ses performances. Chaque traitement a été répété sur trois blocs randomisés, les parcelles élémentaires mesurant approximativement 200 m<sup>2</sup>.

Pour évaluer l'effet des couverts de légumineuse associés au blé d'hiver, plusieurs indicateurs ont été recueillis : la biomasse aérienne des couverts (t MS ha<sup>-1</sup>) a été mesurée aux stades deux nœuds (Zadoks 32), floraison (Zadoks 69) et récolte du blé ; le rendement en grain du blé (q MS ha<sup>-1</sup>) et la teneur en protéine des grains (%) ont été déterminés à la récolte de la céréale. Les valeurs obtenues sont issues d'échantillons de plantes prélevés dans trois quadrats de 0.25 m<sup>2</sup> par bloc et par traitement.

Au sein des quadrats de prélèvement de la biomasse aérienne des légumineuses, les adventices ont été dénombrées au cours de l'association (stade deux nœuds, floraison et récolte du blé). La biomasse aérienne des couverts de légumineuses (t MS ha<sup>-1</sup>) ainsi que des adventices (kg MS ha<sup>-1</sup>) a également été mesurée en fin d'automne, 24 semaines après la récolte du blé d'hiver, qui a eu lieu début juillet. Aucun désherbage n'a été effectué sur les essais entre la récolte du blé et la destruction des couverts. Seul l'exploitant de la parcelle A09 a souhaité désherber mécaniquement le traitement témoin de son essai durant l'été. Par conséquent, cette parcelle n'a pas été prise en compte dans l'analyse de l'effet des couverts de légumineuses sur la biomasse des adventices durant l'interculture.

L'évaluation de l'effet des couverts sur la dynamique de l'azote dans le système sol-plante a concerné : (i) l'enrichissement du système sol-plante en azote, (ii) le contrôle du lessivage, et (iii) la restitution d'azote à la culture de vente suivant l'association relais.

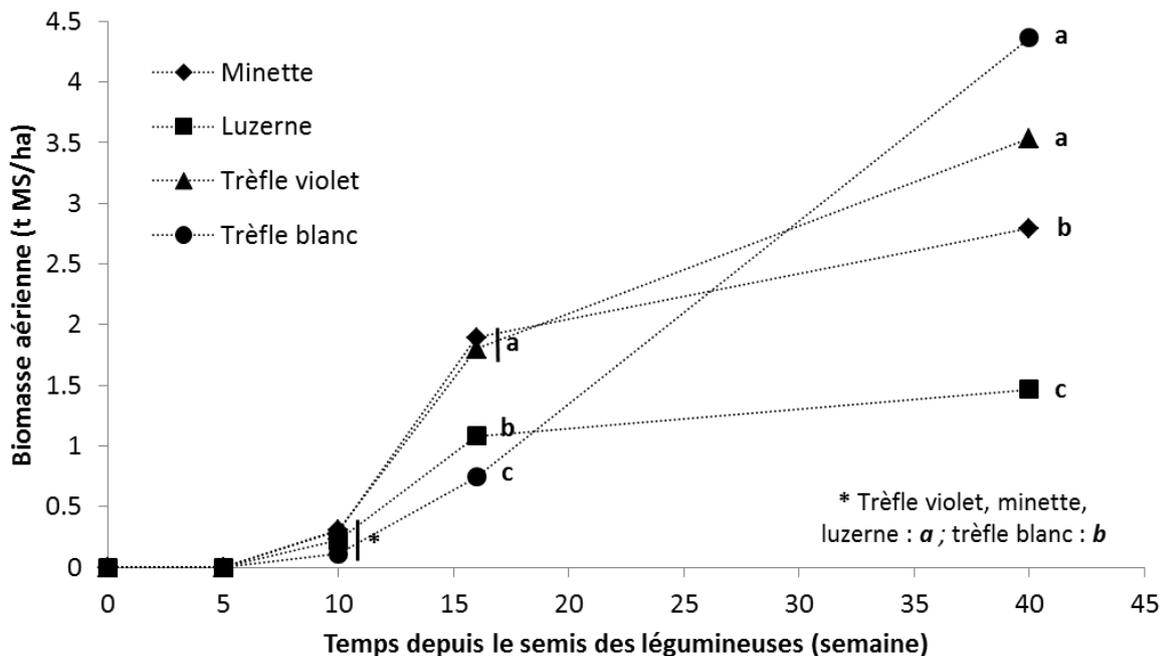
Ainsi, (i) à la fin de l'automne, la quantité d'azote contenue dans la biomasse aérienne des légumineuses a été mesurée et la part d'azote issu de la fixation symbiotique a été déterminée par la méthode de l'abondance naturelle en <sup>15</sup>N (Unkovich *et al.*, 2008) ; (ii) des mesures de la quantité d'azote minéral du sol sur l'horizon 0-90 cm ont été réalisées à la fin de l'automne, à la sortie de l'hiver (destruction des couverts) et à la levée du maïs suivant. Ces mesures d'azote minéral du sol ont permis de modéliser les flux d'eau et d'azote minéral sortant du système par lessivage (kg N ha<sup>-1</sup>) à l'aide du modèle LIXIM développé par Mary *et al.* (1999). Ce modèle se base sur des mesures du contenu en eau et en azote minéral du sol ainsi que sur des caractéristiques pédo-climatiques simples (densité apparente, humidité à la capacité au champ et au point de flétrissement permanent du sol ; température moyenne, précipitation et évapotranspiration journalières). Le modèle n'a pas été développé pour des situations avec des cultures en croissance, c'est pourquoi il n'a été utilisé qu'à partir de la fin de l'automne, moment où la croissance observée des couverts est nulle du fait des faibles températures. Enfin, (iii) la restitution d'azote au système par les couverts a été évaluée à partir du contenu en azote des pailles et des grains du blé et du maïs (kg N ha<sup>-1</sup>) ainsi que du rendement en grains (q MS ha<sup>-1</sup>) du maïs, déterminés à la récolte. Aucune fertilisation n'a été apportée au printemps sur la culture suivante, y compris sur le traitement témoin sans couvert.

## 2. Résultats

### 2.1 Performances des cultures associées

A la montaison du blé, cinq semaines après le semis des légumineuses sous couvert, la biomasse aérienne des couverts était négligeable ( $<0.4$  t MS ha<sup>-1</sup>). Ce n'est qu'à partir de la floraison du blé que la minette, la luzerne et le trèfle violet se sont distingués du trèfle blanc dont la biomasse est restée très faible (0.3 vs. 0.1 t MS ha<sup>-1</sup>) (Figure 2). Entre la floraison du blé et sa récolte, la dessiccation des feuilles de blé, au cours du remplissage des grains, a entraîné une augmentation de la quantité de rayonnement lumineux atteignant les légumineuses (Blaser *et al.*, 2006). Leur croissance aérienne s'est alors accélérée durant cette phase de l'association. Au terme de l'association, la minette et le trèfle violet présentaient la plus forte biomasse aérienne (1.9 et 1.8 t MS ha<sup>-1</sup>, respectivement) suivies de la luzerne (1.1 t MS ha<sup>-1</sup>). Le trèfle blanc a conservé une faible biomasse sous couvert (0.7 t MS ha<sup>-1</sup>).

Les variétés testées de minette et de trèfle violet ont mieux supporté la compétition du blé que celles de luzerne et de trèfle blanc. Le port érigé de la luzerne ne semble pas lui avoir apporté d'avantage sous couvert du blé comparativement à la minette et au trèfle violet, aux ports plus bas. Enfin, la croissance naturellement lente et la forte réponse photomorphogénétique du trèfle blanc ont été pénalisées par l'ombrage du blé dans toutes les situations testées.



**Figure 2 :** Dynamique de croissance aérienne (t MS ha<sup>-1</sup>, lignes pointillées) des couverts de légumineuses du semis des espèces à la fin de l'automne (semaine 40 après semis des couverts). Moyenne des quatre sites suivis. Des lettres différentes à chaque date indiquent des différences significatives entre les traitements au seuil alpha = 10%. Semaine 5 (S5) = stade 2 nœuds du blé (Zadoks 32) ; S10 = floraison du blé (Zadoks 69) ; S16 = récolte du blé ; S40 = fin de l'automne.

A la récolte du blé, le rendement en grains des traitements témoins de chaque site a varié de 23.4 à 44.7 q MS ha<sup>-1</sup> (données non présentées) ce qui est conforme aux observations de David *et al.* (2005) obtenues dans des exploitations biologiques de la région Rhône-Alpes. En moyenne sur l'ensemble des quatre sites, la présence d'un couvert de légumineuse n'a pas eu d'effet significatif sur le rendement en grains du blé associé. Malgré une accélération de la croissance des couverts à partir de la floraison du blé, leur croissance est restée modérée et n'a pas affecté suffisamment la disponibilité des ressources trophiques pour diminuer le rendement du blé.

Nous avons observé un effet nul à dépressif de la présence des couverts associés au blé sur le taux de protéines (Tableau 1). En moyenne sur les quatre sites, la présence de la minette a entraîné une diminution du taux protéique des grains de 0.4 %. La présence du trèfle violet associé a induit une diminution de 0.3 %. En revanche, luzerne et trèfle blanc n'ont pas eu d'effet significativement dépressif, en dehors de la parcelle B10. L'augmentation de la croissance des couverts à partir de la floraison du blé a été suffisante pour que la compétition pour les ressources trophiques réduise le taux protéique du blé. Malgré un fort développement aérien de certains couverts tels que le trèfle violet, la canopée des légumineuses est restée bien en-dessous de celle du blé, excluant une compétition pour la ressource lumineuse.

**Tableau 1** : Taux protéique des grains de blé (%) sur les quatre sites suivis et en moyenne

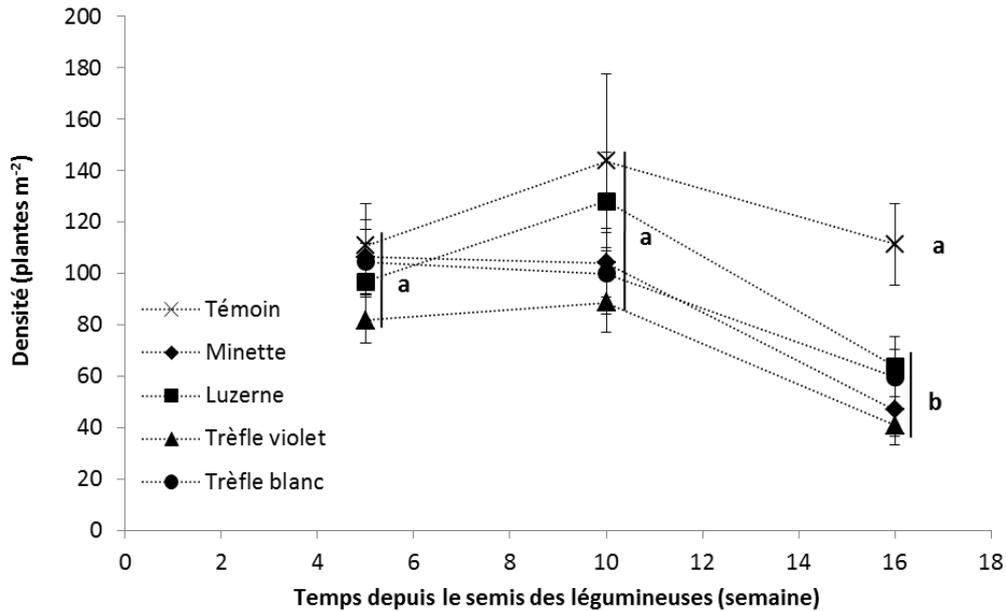
	<b>A09</b>	<i>ES</i> <sup>a</sup>		<b>B10</b>	<i>ES</i>		<b>C10</b>	<i>ES</i>		<b>D10</b>	<i>ES</i>	<b>Moyenne</b>	<i>ES</i>	
Témoin	10.1	0.1	<b>a</b>	10.5	0.2	<b>a</b>	10.5	0.2	<b>ab</b>	10.2	0.6	10.2	0.1	<b>a</b>
Minette	9.5	0.1	<b>b</b>	9.3	0.1	<b>c</b>	10.2	0.2	<b>bc</b>	10.4	0.5	9.8	0.2	<b>b</b>
Luzerne	10.1	0.3	<b>a</b>	9.7	0.2	<b>bc</b>	10.4	0.2	<b>ab</b>	9.8	0.4	10	0.1	<b>ab</b>
Trèfle violet	9.8	0.3	<b>ab</b>	9.4	0.2	<b>bc</b>	10	0.2	<b>c</b>	10.6	0.5	9.9	0.2	<b>b</b>
Trèfle blanc	10.2	0.2	<b>a</b>	9.8	0.1	<b>b</b>	10.7	0.2	<b>a</b>	10	0.4	10.2	0.1	<b>a</b>
<b>P-value</b>	<b>0.022</b>			<b>0.001</b>			<b>0.005</b>			0.75		<b>&lt;0.001</b>		

<sup>a</sup> Erreur standard de la moyenne (n = 3 sur chaque site ; n = 12 pour la moyenne)

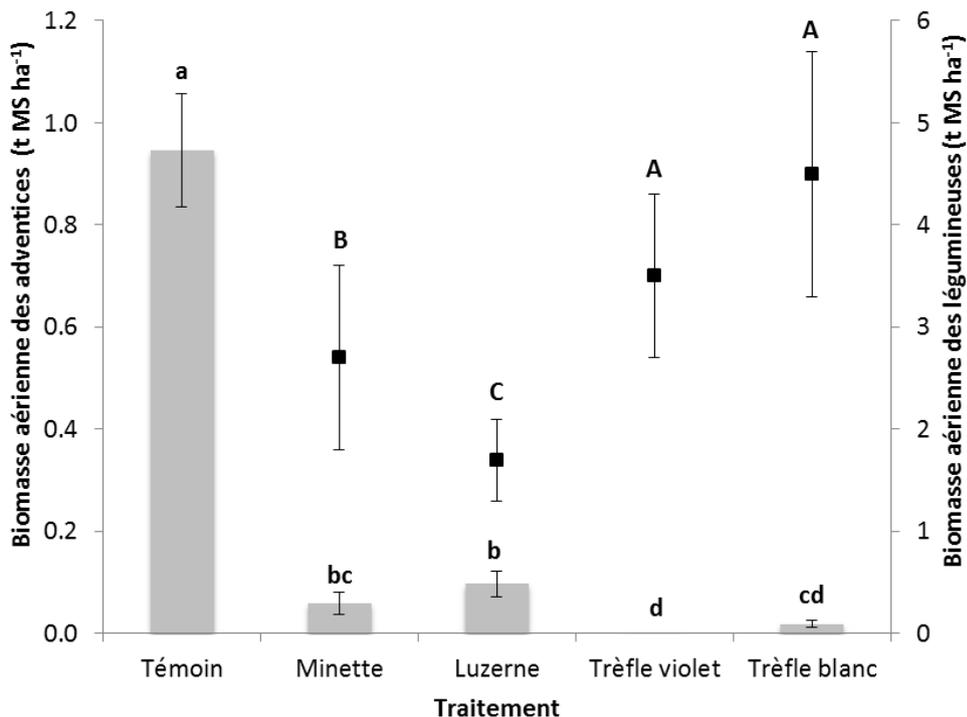
## 2.2 Contrôle des adventices par les couverts associés

Durant la phase d'association blé / couvert de légumineuse, la présence des couverts n'a pas eu d'effet significatif sur la biomasse aérienne des adventices (données non présentées). La croissance des couverts n'était pas suffisante pour permettre une limitation du développement des adventices. En revanche, la présence des couverts a permis de diminuer significativement la densité des adventices (Figure 3), notamment des espèces printanières (données non présentées), au moment de la récolte du blé. Cette diminution a été observée pour les quatre espèces de légumineuses réduisant en moyenne de 52% la densité d'adventices observée sur le traitement témoin. La compétition pour la lumière a dû être suffisante pour limiter l'émergence de nouvelles adventices à levée printanière ou indéterminée, entre la floraison et la récolte du blé associé (Kruidhof *et al.*, 2008).

Ce n'est que durant l'interculture que le développement des couverts s'est avéré suffisant pour contrôler la biomasse aérienne des adventices. La Figure 4 illustre le contrôle de la biomasse aérienne des adventices par les couverts comparativement au traitement témoin non désherbé entre la récolte du blé et la fin de l'automne. La biomasse d'adventices observée sur le traitement témoin était très largement supérieure à celle observée sur les traitements avec couverts. Les trèfles ont présenté un contrôle des adventices significativement plus important que la minette et la luzerne. Le retard de croissance du trèfle blanc à la récolte du blé a été largement rattrapé à partir du moment où la compétition du blé a disparue. A la fin de l'automne, les trèfles ont présenté la plus forte biomasse aérienne (Figure 2), ce qui explique leur meilleure efficacité dans le contrôle des adventices.



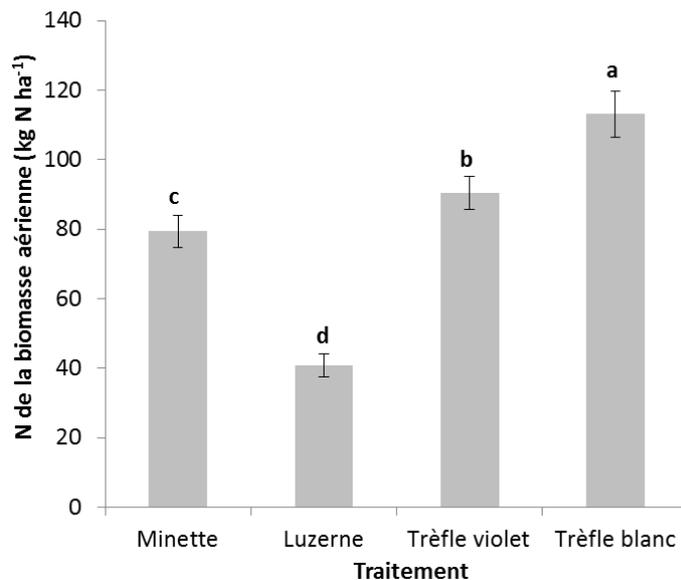
**Figure 3** : Dynamique de densité des adventices (plantes  $m^{-2}$ ) durant la phase d'association du blé avec les couverts de légumineuses. Moyenne des quatre sites suivis. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard de la moyenne ( $n = 36$ ). Des lettres différentes à chaque date indiquent des différences significatives entre les traitements au seuil  $\alpha = 10\%$ . Semaine 5 (S5) = stade 2 nœuds du blé (Zadoks 32) ; S10 = floraison du blé (Zadoks 69) ; S16 = récolte du blé.



**Figure 4** : Biomasse aérienne des adventices (histogrammes ; t MS  $ha^{-1}$ ) et des légumineuses (■ ; t MS  $ha^{-1}$ ) à la fin de l'automne, 40 semaines après le semis des couverts de légumineuses et 24 semaines après la récolte du blé d'hiver. Moyenne des trois sites suivis sur l'ensemble des traitements à cette date. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard de la moyenne ( $n = 27$ ). Des lettres différentes (minuscules pour la biomasse des adventices, majuscules pour celle des légumineuses) indiquent des différences significatives entre les traitements au seuil  $\alpha = 10\%$ .

### 2.3 Couverts associés et dynamique de l'azote

Le classement des espèces de légumineuses pour la quantité d'azote accumulé dans les parties aériennes à la fin de l'automne suit proportionnellement les quantités de biomasse aérienne accumulée à cette date (Figure 5). Le trèfle blanc a accumulé la plus grande quantité d'azote dans ses tissus aériens, suivi du trèfle violet, de la minette et de la luzerne. La part d'azote issue de la fixation symbiotique représentait entre  $76 \pm 8$  % et  $94 \pm 2$  % (moyenne  $\pm$  erreur standard de la moyenne,  $n = 12$ ) de la quantité totale d'azote contenue dans les parties aériennes des légumineuses, sans différence significative entre les quatre espèces (données non présentées). Ces valeurs élevées de fixation symbiotique sont en accord avec les valeurs mentionnées pour le trèfle violet et le trèfle blanc dans les études de Høgh-Jensen et Schjoerring (2001) et de Carlsson et Huss-Danell (2003).



**Figure 5 :** Accumulation d'azote (N) dans les parties aériennes des couverts (kg N ha<sup>-1</sup>) en semaine 40 après semis des couverts. Moyenne des quatre sites suivis. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard de la moyenne ( $n = 12$ ). Des lettres différentes indiquent des différences significatives entre les traitements au seuil alpha = 10%.

L'évaluation du lessivage des nitrates a montré, d'une part, que durant la période hivernale, les quantités d'azote lessivées étaient faibles ( $< 20$  kg N ha<sup>-1</sup>) et, d'autre part, que la présence des légumineuses durant l'interculture n'avait pas d'influence sur les pertes hivernales d'azote, comparativement au traitement témoin au sol nu (Tableau 2).

En termes de restitution d'azote au système, la quantité d'azote accumulée à la récolte par le blé associé variait de 71 à 75 kg N ha<sup>-1</sup> sans effet de la présence des couverts sur cette quantité (données non présentées). Le trop faible développement des couverts de légumineuses n'a pas conduit à une augmentation de l'accumulation d'N dans le blé. Les couverts les plus développés ont plutôt eu tendance à limiter le transfert d'azote vers les grains de blé, entre la floraison et la récolte du blé.

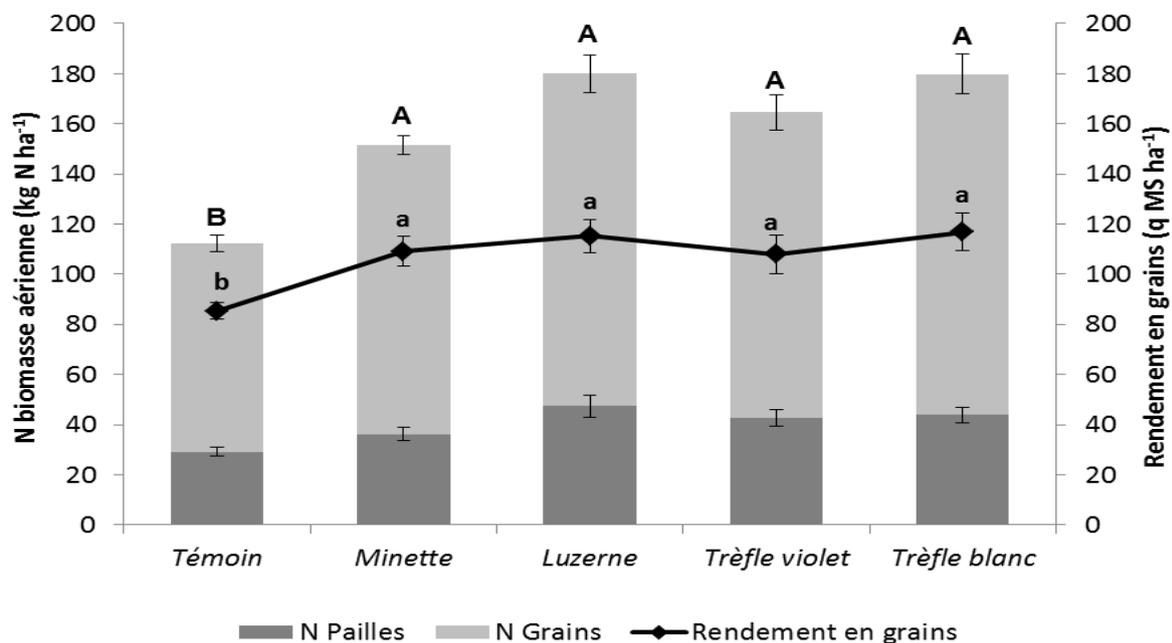
L'intérêt des couverts de légumineuses durant l'interculture réside principalement dans la restitution de l'azote accumulé à la culture suivante (Crews et Peoples, 2005). La quantité d'azote contenu dans les parties aériennes du maïs suivant à la récolte était en moyenne supérieure de 50% (+57 kg N ha<sup>-1</sup>) par rapport au maïs témoin (Figure 6). Le rendement en grains s'est trouvé également fortement amélioré avec un gain moyen pour les quatre espèces de couverts d'interculture de +27 q MS ha<sup>-1</sup> par rapport au traitement témoin (85 q MS ha<sup>-1</sup>), sans apport d'azote supplémentaire.

**Tableau 2 :** Quantités d'azote minéral lessivées entre la fin de l'automne, 40 semaines après le semis des couverts (S40), et la fin de l'hiver (S52), date de destruction des couverts par labour, entre S52 et la levée de la culture suivante (S64) et quantités cumulées entre S40 et S64.

Traitement	S40-S52	ES <sup>a</sup>	S52-S64	ES	S40-S64	ES
Témoin	6.9	5.1	6.8	3.7	13.6	8.7
Minette	5.6	4	8.9	6.9	14.5	10.8
Luzerne	4.8	2.1	11.9	7.3	16.6	8.9
Trèfle violet	3.6	2.1	9.4	6.9	13	9
Trèfle blanc	2.6	1.4	8.7	6.5	11.3	7.7
<b>P-value</b>	0.94		0.48		0.79	

<sup>a</sup> Erreur standard de la moyenne (n = 4)

L'enrichissement en azote du maïs et l'amélioration de son rendement en grains illustrent, dans notre cas, une forte minéralisation des résidus des couverts de légumineuses dans le sol en adéquation avec les besoins de la culture de printemps. Les gains économiques associés sont significatifs. Avec 21 kg N nécessaire à la production d'une tonne de grains de maïs, l'économie d'engrais organique représenterait ici 57 kg N ha<sup>-1</sup>.



**Figure 6 :** Quantité d'azote (N) accumulé dans la paille et les grains (kg N ha<sup>-1</sup>, histogrammes) et rendement en grains de la culture de maïs suivant (q MS ha<sup>-1</sup>, points). Moyenne des quatre sites suivis. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard de la moyenne (n = 12). Des lettres différentes indiquent des différences significatives entre les traitements au seuil alpha = 10%.

### 3. Discussion générale et conclusions

Certains de nos résultats présentent des similitudes avec ceux obtenus par de précédents auteurs. En effet, l'absence d'impact de l'association sur le rendement du blé avait également été montrée en conditions d'agriculture conventionnelle (Thiessen Martens *et al.*, 2001 ; Mutch *et al.*, 2003 ; Blackshaw *et al.*, 2010 ; Bergkvist *et al.*, 2011) ou biologique (Hartl, 1989 ; Becker et Leithold, 2008). Des études sur des systèmes comparables en agriculture conventionnelle avaient également montré que le trèfle violet sous couvert développait une biomasse aérienne plus élevée que le trèfle blanc (Bergkvist *et al.*, 2011) ou la luzerne (Thiessen Martens *et al.*, 2001 ; Blaser *et al.*, 2011) pendant la phase d'association avec le blé. Sur le contrôle des adventices en conditions d'agriculture conventionnelle, Blackshaw *et al.* (2010) avaient observé des résultats similaires sur l'absence de contrôle de la biomasse des adventices durant l'association avec un couvert de luzerne semé en relais dans un blé d'hiver. Le contrôle de la densité des adventices par le couvert de légumineuse avait été mis en évidence dans le cas d'une association relais de trèfle violet et de blé (Blaser *et al.*, 2006 ; Blaser *et al.*, 2011). Enfin, l'efficacité des couverts de légumineuses associés en relais au blé d'hiver avait été observée durant l'interculture, deux à douze semaines après la récolte du blé (Mutch *et al.*, 2003 ; Blaser *et al.*, 2006 ; Blackshaw *et al.*, 2010 ; Bergkvist *et al.*, 2011 ; Blaser *et al.*, 2011). Concernant la préservation de l'azote dans le système sol-plante, Askegaard et Eriksen (2008) ou Vyn *et al.* (2000) avaient montré une réelle efficacité de couverts de trèfles dans la limitation du lessivage des nitrates durant l'interculture. Sans atteindre les niveaux d'efficacité observés par ces auteurs, notre étude a confirmé l'utilité des couverts de légumineuses dans les systèmes biologiques testés pour prévenir les pertes d'azote minéral par lessivage de la fin de l'automne à la levée de la culture suivante.

En revanche, nos résultats apportent des éléments nouveaux dans la connaissance de ces associations en conditions d'AB. Premièrement, nos résultats montrent un risque de diminution du taux protéique des grains de blé lorsque les légumineuses supportent bien la compétition du blé et se développent de façon importante sous couvert de blé (minette et trèfle violet). Peu d'études se sont centrées sur le taux protéique des grains, indicateur clé du paiement de la collecte. Aucune étude n'avait mis en avant d'effet significatif de la présence des couverts de légumineuses sur le taux protéique des grains de blé associé, en agriculture conventionnelle (Blackshaw *et al.*, 2010) ou biologique (Becker et Leithold, 2008). Nous avons ensuite montré le contrôle effectif des couverts sur la densité des adventices printanières durant l'association. Enfin, les couverts de légumineuses insérés en association relais dans la rotation n'avaient pas ou peu montré leur intérêt sur la culture suivante en agriculture conventionnelle. Les gains de rendement de la culture suivant un couvert de trèfle violet associé en relais à un blé d'hiver étaient faibles pour Vyn *et al.* (2000) ou Blackshaw *et al.* (2010), voire nuls pour Henry *et al.* (2010). Au contraire, nos observations ont montré que ces couverts de légumineuses, laissés en interculture, pouvaient avoir un intérêt fort sur l'accumulation d'azote et le rendement en grains de la culture de maïs suivante.

Le choix d'une espèce de légumineuse à insérer dans la rotation dépend des objectifs que s'est fixé l'agriculteur : couverture du sol, accumulation d'azote, production de biomasse, etc. Dans notre étude, il semble que la variété de trèfle blanc utilisée présente, en moyenne, le plus grand nombre d'avantages à l'échelle de la succession des deux cultures face aux facteurs limitants principaux identifiés. En effet, le risque de diminution du taux protéique du blé associé est très faible avec cette variété et la biomasse qu'il développe après la récolte du blé lui permet de fortement couvrir le sol, ce qui garantit un bon contrôle des adventices durant l'interculture. D'autre part, la forte accumulation de biomasse garantit une forte accumulation d'azote dans le couvert qui, si les conditions sont favorables à la minéralisation, sera restitué à la culture suivante. La variabilité inter-sites de la croissance de cette légumineuse est toutefois la plus forte des quatre espèces testées. La variété de trèfle violet utilisée présente également de bonnes performances moyennes post-récolte du blé mais le risque d'une diminution du taux protéique des grains semble plus important. Cette étude a également permis d'élargir la gamme des espèces de légumineuses testées dans ces conditions d'association. La minette, espèce assez peu

représentée dans la littérature sur ces questions, s'est illustrée par des performances intermédiaires entre les deux trèfles et la luzerne, à l'échelle de la succession, avec des risques de dépréciation du taux protéique des grains du blé associé. Enfin, la variété de luzerne s'est montrée sensible à la compétition du blé dans un premier temps sans pouvoir rattraper son retard de croissance par rapport aux trois autres espèces. Plus tard, l'espèce s'est montrée, sur tous les sites d'expérimentation, sensible à la baisse des températures durant l'automne et s'est défoliée, ce qui explique sa faible biomasse en fin d'automne et par conséquent le moindre contrôle des adventices associé à une faible couverture du sol.

Nous avons fait l'hypothèse que le décalage des dates de semis de la céréale d'hiver et des légumineuses serait suffisant pour limiter la compétition inter-spécifique pour les ressources pour, d'une part, limiter les préjudices à la culture de blé et, d'autre part, permettre aux couverts d'être suffisamment implantés sur la parcelle au moment de la récolte de la céréale. Seule la seconde hypothèse a été validée. Nous avons montré que les couverts de légumineuses étaient efficaces dans le contrôle de la densité des adventices dès la phase d'association et que ce contrôle se renforçait durant l'interculture. La présence des couverts durant l'interculture empêche l'agriculteur de réaliser des faux-semis pour épuiser le stock semencier du sol. Malgré cela, plusieurs études ont pu montrer l'intérêt des couverts de légumineuses dans la diminution du stock semencier du sol (Gallandt et Molloy, 2008; Mirsky *et al.*, 2010) levant en partie les craintes liées à l'impossibilité d'intervenir mécaniquement pour contrôler les adventices. Nous avons enfin illustré l'intérêt de ces couverts dans l'enrichissement et surtout la restitution en azote des systèmes de culture biologiques sans élevage fréquemment soumis aux déficits azotés.

L'évaluation de l'intérêt économique d'une telle pratique doit prendre en compte les gains de rendement et les économies d'engrais organiques et de désherbage mécanique permis mais aussi le coût des semences et de leur implantation. Il est donc nécessaire d'effectuer ce bilan à l'échelle de la succession culturale et pas uniquement de la culture suivant le couvert de légumineuse. Cette estimation des charges et bénéfices de cette pratique pour l'agriculteur pourrait faire l'objet d'un travail ultérieur. Une prise en compte plus fine de leurs pratiques habituelles, telles que la fertilisation des cultures ou la gestion des couverts d'interculture (fauche, date de destruction), permettrait aussi de mieux accompagner les agriculteurs dans l'insertion de ces pratiques agroécologiques dans leurs systèmes de culture en choisissant des espèces et une gestion adéquates.

**Remerciements** : Ce travail a été financé par l'ERA-Net CORE Organic dans le cadre du projet de recherche AGTEC-Org, par le projet PEPITES financé par l'Agence Nationale de la Recherche dans le cadre du programme Systema: ANR-08-STRA-10 et par la région Rhône-Alpes dans le cadre du CPER Agriculture Biologique. Les auteurs remercient l'entreprise Jouffray-Drillaud pour la fourniture des semences de légumineuses, T. Lhuillery, M. Guérin, G. Goulevant et les stagiaires pour le support technique et humain fourni. Enfin les auteurs remercient tout particulièrement les paysans (J.-M. Chancel, P. Vacher et D. Valentin) sans qui ce travail n'aurait été possible.

### Références bibliographiques

- Andersen M.K., Hauggaard-Nielsen H., Weiner J., Jensen E.S., 2007. Competitive dynamics in two- and three-component intercrops. *J. Appl. Ecol.* 44, 545-551.
- Antichi D., Mazzoncini M., Bàrberi P., Bigongiali F., Carpi G., 2008. Leguminous cover crops: an important tool for improving resource use efficiency in organic arable cropping systems. 16th IFOAM Organic World Congress, Modena, Italy, p. 4.
- Askegaard M., Eriksen J., 2007. Growth of legume and nonlegume catch crops and residual-N effects in spring barley on coarse sand. *J. Plant Nutr. Soil Sc.* 170, 773-780.

- Askegaard M., Eriksen J., 2008. Residual effect and leaching of N and K in cropping systems with clover and ryegrass catch crops on a coarse sand. *Agr. Ecosys. Environ.* 123, 99-108.
- Bàrberi P., 2002. Weed management in organic agriculture: are we addressing the right issues? *Weed Res.* 42, 177-193.
- Becker K., Leithold G., 2008. Improvement of winter wheat baking quality in ecological cultivation by enlargement of row spacing and undersown intercrops. In: D. Neuhoff, N. Halberg, T. Alföldi, W. Lockeretz, A. Thommen, I.A. Rasmussen, J. Hermansen, M. Vaarst, L. Lueck, F. Caporali, H. H. Jensen, Migliorini, P., Willer, H. (Eds.), *Second Scientific conference of the International Society of Organic Agriculture Research (ISO FAR), 16th IFOAM Organic World Congress, Modena, Italy*, pp. 550-553.
- Bergkvist G., Stenberg M., Wetterlind J., Båth B., Elfstrand S., 2011. Clover cover crops under-sown in winter wheat increase yield of subsequent spring barley - Effect of N dose and companion grass. *Field Crop. Res.* 120, 292-298.
- Blackshaw R.E., Molnar L.J., Moyer J.R., 2010. Suitability of legume cover crop-winter wheat intercrops on the semi-arid Canadian prairies. *Can. J. Plant Sci.* 90, 479-488.
- Blaser B.C., Gibson L.R., Singer J.W., Jannink J.-L., 2006. Optimizing seeding rates for winter cereal grains and frost-seeded red clover intercrops. *Agron. J.* 98, 1041-1049.
- Blaser B.C., Singer J.W., Gibson L.R., 2011. Winter cereal canopy effect on cereal and interseeded legume productivity. *Agron. J.* 103, 1180-1185.
- Bond W., Grundy A.C., 2001. Non-chemical weed management in organic farming systems. *Weed Res.* 41, 383-405.
- Bruulsema T.W., Christie B.R., 1987. Nitrogen contribution to succeeding corn from alfalfa and red clover. *Agron. J.* 79, 96-100.
- Carlsson G., Huss-Danell K., 2003. Nitrogen fixation in perennial forage legumes in the field. *Plant Soil* 253, 353-372.
- Carof M., de Tourdonnet S., Saulas P., Le Floch D., Roger-Estrade J., 2007. Undersowing wheat with different living mulches in a no-till system. II. Competition for light and nitrogen. *Agron. Sustain. Dev.* 27, 357-365.
- Casagrande M., David C., Valantin-Morison M., Makowski D., Jeuffroy M.-H., 2009. Factors limiting the grain protein content of organic winter wheat in south-eastern France: a mixed-model approach. *Agron. Sustain. Dev.* 29, 565-574.
- Crews T., Peoples M., 2005. Can the synchrony of nitrogen supply and crop demand be improved in legume and fertilizer-based agroecosystems? A review. *Nutr. Cycl. Agroecosys.* 72, 101-120.
- David C., Jeuffroy M.-H., Henning J., Meynard, J.-M., 2005. Yield variation in organic winter wheat: a diagnostic study in the Southeast of France. *Agron. Sustain. Dev.* 25, 213-223.
- David C., Mundler P., Demarle O., Ingrand S., 2010. Long-term strategies and flexibility of organic farmers in southeastern France. *Int. J. Agric. Sustain.* 8, 305-318.
- Fustec J., Lesuffleur F., Mahieu S., Cliquet J.-B., 2010. Nitrogen rhizodeposition of legumes. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 30, 57-66.
- Gallandt E.R., Molloy T., 2008. Exploiting weed management benefits of cover crops requires pre-emption of seed rain. In: Neuhoff, D., Halberg, N., Alföldi, T., Lockeretz, W., Thommen, A., Rasmussen, I.A., Hermansen, J., Vaarst, M., Lueck, L., Caporali, F., Jensen, H.H., Migliorini, P., Willer, H. (Eds.), *Cultivating the future based on science. Volume 1: Organic Crop Production. Proceedings of the Second Scientific Conference of the International Society of Organic Agriculture Research (ISO FAR). International Society of Organic Agricultural Research (ISO FAR), Modena, Italy*, pp. 414-417.
- Hartl W., 1989. Influence of undersown clovers on weeds and on the yield of winter wheat in organic farming. *Agr. Ecosyst. Environ.* 27, 389-396.
- Hartwig N.L., Ammon H.U., 2002. Cover crops and living mulches. *Weed Sci.* 50, 688-699.

- Henry D.C., Mullen R.W., Dygert C.E., Diedrick K.A., Sundermeier A., 2010. Nitrogen contribution from red clover for corn following wheat in Western Ohio. *Agron. J.* 102, 210-215.
- Hesterman O.B., Griffin T.S., Williams P.T., Harris G.H., Christenson D.R., 1992. Forage legume-small grain intercrops: nitrogen production and response of subsequent corn. *J. Prod. Agric.* 5, 340-348.
- Hiltbrunner J., Liedgens M., Bloch L., Stamp P., Streit B., 2007. Legume cover crops as living mulches for winter wheat: Components of biomass and the control of weeds. *Eur. J. Agron.* 26, 21-29.
- Høgh-Jensen H., Schjoerring J.K., 2001. Rhizodeposition of nitrogen by red clover, white clover and ryegrass leys. *Soil Biol. Biochem.* 33, 439-448.
- Kruidhof H.M., Bastiaans L., Kropff M.J., 2008. Ecological weed management by cover cropping: effects on weed growth in autumn and weed establishment in spring. *Weed Res.* 48, 492-502.
- Mary B., Beaudoin N., Justes E., Machet J.M., 1999. Calculation of nitrogen mineralization and leaching in fallow soil using a simple dynamic model. *Eur. J. SoilSci.* 50, 549-566.
- Mazzoncini M., Bàrberi P., Cerrai D., Rinaudo V., Belloni P., 2004. Effects of green manure on soil nitrogen availability and crop productivity in a Mediterranean organic farming system. In: Wöhrle, N., Scheurer, M. (Eds.), *Eurosoil 2004*, Freiburg, Germany, p. 9.
- Mirsky S.B., Gallandt E.R., Mortensen D.A., Curran W.S., Shumway D.L., 2010. Reducing the germinable weed seedbank with soil disturbance and cover crops. *Weed Res.* 50, 341-352.
- Mutch D.R., Martin T.E., Kosola K.R., 2003. Red clover (*Trifolium pratense*) suppression of common ragweed (*Ambrosia artemisiifolia*) in winter wheat (*Triticum aestivum*). *Weed Technol.* 17, 181-185.
- Olesen J.E., Askegaard M., Rasmussen, I.A., 2009. Winter cereal yields as affected by animal manure and green manure in organic arable farming. *Eur. J. Agron.* 30, 119-128.
- Robson M.C., Fowler S.M., Lampkin N.H., Leifert, C., Leitch M., Robinson D., Watson C.A., Litterick A.M., 2002. The agronomic and economic potential of break crops for ley/arable rotations in temperate organic agriculture. *Adv. Agron.* 77, 369-427.
- Sheaffer C.C., Seguin P., 2003. Forage legumes for sustainable cropping systems. *J. CropProd.* 8, 187-216.
- Shili-Touzi I., De Tourdonnet S., Launay M., Dore T., 2010. Does intercropping winter wheat (*Triticum aestivum*) with red fescue (*Festuca rubra*) as a cover crop improve agronomic and environmental performance? A modeling approach. *Field Crop. Res.* 116, 218-229.
- Teasdale J.R., Brandsæter L.O., Calegari A., Skora Neto F., 2007. Cover Crops and Weed Management. In: Upadhyaya, M.K., Blackshaw, R.E. (Eds.), *Non-chemical weed management: principles, concepts and technology*. CABI, Wallingford, United Kingdom, pp. 49-64.
- Thiessen Martens J.R., Hoepfner J.W., Entz M.H., 2001. Legume cover crops with winter cereals in Southern Manitoba: Establishment, productivity, and microclimate effects. *Agron. J.* 93, 1086-1096.
- Turner R.J., Davies G., Moore H., Grundy A.C., Mead A., 2007. Organic weed management: A review of the current UK farmer perspective. *Crop Prot.* 26, 377-382.
- Unkovich M., Herridge D., Peoples M., Cadisch G., Boddey B., Giller K., Alves B., Chalk P., 2008. Measuring plant-associated nitrogen fixation in agricultural systems. Australian Centre for International Agricultural Research (ACIAR), Canberra, Australia.
- Vyn T.J., Faber J.G., Janovicek K.J., Beauchamp E.G., 2000. Cover crop effects on nitrogen availability to corn following wheat. *Agron. J.* 92, 915-924.
- Wei D., Liping C., Zhijun M., Guangwei W., Ruirui Z., 2010. Review of non-chemical weed management for green agriculture. *Int. J. Agric. Biol. Eng.* 3, 52-60.