



AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-memoires-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

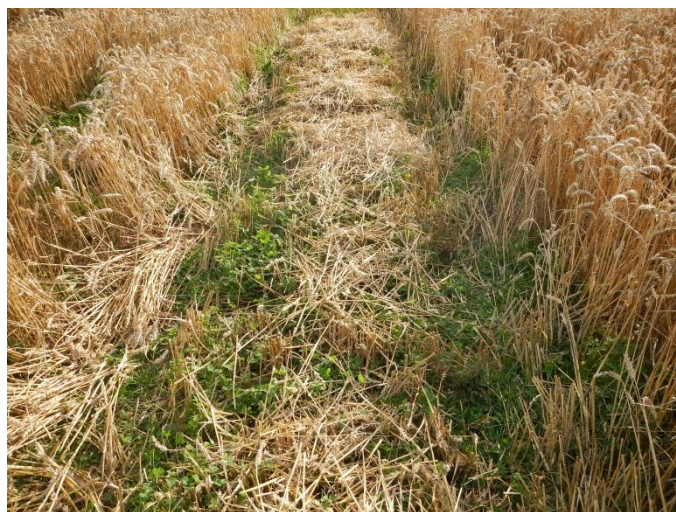
2013-2014

MASTER FAGE

**Biologie et Ecologie pour la Forêt,
l'Agronomie et l'Environnement**

Spécialité FGE – Parcours Agroécologie

**IMPACTS D'UN COUVERT PERENNE
DE LEGUMINEUSE SUR LA CULTURE
DU BLE TENDRE D'HIVER
ET CONDUITE DU SYSTEME**



Nicolas CARTON

Mémoire de stage, soutenu à NANCY le 3 septembre 2014

Maître de stage : Jérôme LABREUCHE, ingénieur Arvalis

Tuteur universitaire : Séverine PIUTTI, maître de conférences ENSAIA-INRA

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier tout particulièrement Jérôme Labreuche pour ses conseils avisés et son expertise lors de l'encadrement de mon stage. L'expérience qu'il m'a apportée et les échanges que nous avons pu avoir ont beaucoup enrichi ma vision de l'agronomie et vont m'être d'une grande utilité par la suite.

J'adresse mes remerciements à l'équipe du Service Agronomie Economie Environnement d'Arvalis-Institut du Végétal pour l'accueil chaleureux et la convivialité et plus particulièrement aux membres du pôle Agro-Equipement pour le travail effectué sur le terrain, les réponses à mes nombreuses questions et le soutien aussi bien technique que moral ! Florent Duyme et François Piraux m'ont aidé à dompter les données grâce aux statistiques avec leur pédagogie et leur patience et Alain Besnard a bien voulu partager ses connaissances sur les espèces de légumineuses fourragères, je leur suis très reconnaissant pour le temps qu'ils m'ont accordé. Les personnes de l'institut que j'ai contactées de façon ponctuelle ont toujours su me renseigner avec sympathie. Je souhaite également adresser mes remerciements aux agriculteurs et conseillers rencontrés au fil des visites d'essais et avec qui les échanges ont été très enrichissants. Pour finir, merci à la compagnie des stagiaires et CDD qui ont rendu la vie à Boigneville palpitante !

SOMMAIRE :

Introduction.....	5
I. Impacts du couvert végétal pérenne	7
A. Interactions et conséquences globales sur le système de culture	7
B. Interactions trophiques et impacts sur les ressources.....	9
II. Conception et conduite du système.....	16
A. Complémentarité entre le couvert et la culture	16
B. Choix du couvert	16
C. Régulation du couvert	18
III. Etude expérimentale et discussion	19
A. Matériels et Méthodes	19
B. Résultats et Discussion.....	22
Conclusion	28
Résumé.....	53

INTRODUCTION

Contexte

Le modèle de production des grandes cultures européennes est face à des enjeux socio-économiques et environnementaux variés. La réglementation et la demande sociétale incitent à progresser dans la conception de systèmes de culture combinant une économie en intrants (engrais azotés de synthèse, phosphore, produits phytosanitaires), l'efficacité énergétique ainsi que la conservation de la biodiversité des campagnes et de la fertilité des sols (Kremen *et al.*, 2012 ; Tilman *et al.*, 2002). D'autre part, les exploitations agricoles sont soumises à une forte pression économique car les coûts liés au matériel et aux intrants augmentent souvent plus rapidement que la valorisation des produits (Van Der Ploeg, 2010). La surface moyenne cultivée par agriculteur a tendance à augmenter et les agriculteurs modernes cherchent à limiter autant que possible leur temps de travail. Ces évolutions se font dans un contexte de croissance des besoins alimentaires mondiaux.

De nombreux scientifiques s'accordent à penser qu'une réponse se trouve dans **l'agroécologie**, vue comme un ensemble de pratiques agricoles dont le principe est la substitution d'intrants par des processus naturels. L'agroécologie est aussi une discipline scientifique dont l'objet d'étude est l'agroécosystème (Wezel *et al.*, 2009). Ce terme a été repris par le gouvernement français, ce qui atteste que le contexte politique agricole est favorable à ce type d'approche.

L'agriculture de conservation, qui combine la réduction du travail du sol, la couverture permanente du sol par des plantes (vivantes ou mortes) et des rotations diversifiées permet souvent de réduire les coûts et de maintenir la fertilité des sols (Scopel *et al.*, 2013). Elle fait donc partie des pistes avancées pour répondre aux enjeux du 21^{ème} siècle.

En France, environ un tiers de la surface en grandes cultures est conduit en **Techniques Culturelles sans Labour** (TCSL) (Labreuche *et al.*, 2008), dont un peu plus de 200 000 ha en **semis direct** (Derpsch et Friedrich, 2009). En Europe, la motivation principale des agriculteurs pour l'adoption du semis direct est la réduction des coûts associés au travail du sol (outils, carburant) (Lahmar, 2010) et le temps économisé. Les difficultés souvent rencontrées en TCSL sont la dégradation de la structure du sol et le développement des populations d'adventices, car le labour servait à « corriger » certaines erreurs agronomiques (Soane *et al.*, 2012).

Les **plantes de service** peuvent permettre de résoudre une partie des problèmes rencontrés en non labour. Les questions environnementales ont fait renaître l'intérêt porté aux **couverts végétaux** (Hartwig et Ammon, 2002). En Europe, ils sont aujourd'hui utilisés principalement en interculture, où ils limitent la lixiviation des nitrates, structurent le sol, réduisent l'érosion et contrôlent les adventices en couvrant le sol, fixent du carbone, etc. (Labreuche, 2011a). Ils sont également un moyen **d'intégrer les légumineuses dans les rotations** et donc d'économiser de l'azote, à l'heure où la culture des légumineuses à graine connaît des difficultés techniques et donc économiques (Voisin *et al.*, 2013).

Afin de maximiser les services fournis par les couverts et de pallier aux problèmes parfois rencontrés pour leur implantation l'été, une piste est d'aller encore plus loin et de conserver le couvert vivant pendant la durée de plusieurs cultures de vente.

Définition de l'objet d'étude

L'objet d'étude de ce mémoire peut être défini comme un système de culture intégrant un couvert « dont le cycle de vie inclut le cycle de développement complet (du semis à la récolte) d'au moins une culture commerciale, l'interculture qui suit cette culture et le début du développement (semis et levée) de la culture commerciale suivante » (Véricel, 2009).

Pour éviter toute confusion avec la notion de couverture permanente du sol, on appellera le type de couvert étudié « **couvert pérenne** ». D'autres dénominations rencontrées sont « couvert permanent », « mulch vivant » ou « paillis vivant » (vient de l'anglais « living mulch »). On appellera les Systèmes intégrant un Couvert Pérenne des « **SCP** ». Ils diffèrent des associations de cultures annuelles, des couverts intermédiaires et des couverts associés relai (définitions en *Annexe 1*). Ces systèmes ont d'abord été développés pour les cultures pérennes (Hiltbrunner *et al.*, 2007b).

Le couvert interagit avec les cultures et les autres composantes du système, ce qui impacte souvent négativement le rendement, car le couvert est généralement trop compétitif. La conduite de l'agriculteur va donc avoir pour objectif de trouver l'optimum, l'équilibre qui lui convient entre les missions qu'il donne au couvert et la compétition que celui-ci peut exercer sur les cultures. Les deux grandes questions liées aux SCP sont donc les suivantes :

- **Quels sont les impacts sur les systèmes de culture d'une couverture du sol par des légumineuses pérennes ?**

- **Comment concevoir et gérer ces systèmes pour maximiser les bénéfices apportés par le couvert et en limiter la compétition ?**

Présentation de l'Institut d'accueil, de ses missions, lien avec la thématique

Arvalis – Institut du Végétal est l'**institut technique des filières grandes cultures** qui concerne les céréales à paille (blé tendre, blé dur, orges, triticale, seigle, avoine, riz...), le maïs (grain, fourrage, semences, doux), le sorgho, les pommes de terre, les fourrages, le tabac et le lin, soit près de 80% de la SAU française. C'est un organisme de recherche appliquée, qui produit des références technico-économiques et agronomiques directement applicables dans les systèmes de production (Site web Arvalis - Institut du Végétal, s. d.).

En France, seuls quelques agriculteurs jouent le rôle de pionniers et expérimentent depuis quelques années le SCP en grandes cultures. Arvalis - Institut du Végétal est en lien avec certains d'entre eux via un réseau d'agriculteurs en semis direct sous couverture végétale permanente (Robert, 2013). Sur le terrain, **les demandes des agriculteurs et de leurs conseillers sont fréquentes**. L'institut travaille sur ce thème depuis quelques années, **mais les impacts sont encore mal connus et la conduite mal maîtrisée**.

Objectifs du stage et plan du mémoire

Les objectifs du stage ont été de faire le point des connaissances actuelles sur les impacts d'un couvert pérenne sur l'ensemble du système de culture et d'identifier les principes de conduite de ce dernier. Les missions confiées correspondent au plan de ce rapport.

Nous étudierons tout d'abord les éléments présents dans la bibliographie qui permettent de comprendre les divers impacts du couvert sur le système ainsi que les interactions entre couvert et culture pour les ressources. Nous présenterons les principes pour la conduite et les informations sur les espèces candidates pour jouer le rôle de couvert pérenne, en lien avec les critères de choix du couvert identifiés. Nous détaillerons ensuite les résultats des essais menés cette année sur la station de Boigneville puis nous les discuterons en intégrant les acquis de la bibliographie afin de fournir des pistes de préconisations pour la conception et la conduite des céréales d'hiver dans ces systèmes de culture. Les essais suivis cette année mettant en jeu uniquement la culture de blé tendre d'hiver, le propos de ce mémoire est centré sur les céréales d'hiver, mais le travail de bibliographie et de préconisation a porté également sur le maïs, autre culture pour laquelle les références sont nombreuses.

I. Impacts du couvert végétal pérenne

A. Interactions et conséquences globales sur le système de culture

1) Interactions entre le couvert et la culture

Dans les systèmes de culture intégrant une plante de couverture pérenne, deux espèces ou plus sont présentes sur le champ cultivé. Ces systèmes font donc partie des systèmes de cultures associées, les espèces partagent donc les ressources du milieu. Des interactions se mettent donc en place, elles sont complexes et dynamiques dans le temps et l'espace. En effet, les conditions pédoclimatiques affectent les espèces du mélange différemment et celles-ci modifient également leur environnement. Les interactions trophiques entre plantes se traduisent par des **relations de compétition ou de facilitation par rapport aux ressources du milieu**. La compétition est le processus dans lequel deux plantes ou populations de plantes interagissent de façon à ce qu'au moins l'une exerce un effet négatif sur l'autre (exemple : prélèvement d'azote par une espèce, ce qui réduit la quantité d'azote disponible pour l'autre). On parle de facilitation lorsqu'au moins une espèce exerce un effet positif sur l'autre (exemple : apport d'azote par fixation symbiotique et libération dans la rhizosphère) (Vandermeer, 1989). Dans les associations de cultures, les plantes du mélange entrent forcément en compétition au moins pour certaines ressources. Il y a donc en plus de la concurrence entre individus de la culture, la compétition exercée par le couvert. Il n'est pas exclu qu'un couvert exerce une compétition pour une ressource et facilite son acquisition par la culture, à une autre période de la saison, à une autre profondeur dans le sol ou pour une culture suivante. Les résultats observés en termes de services, efficacité d'utilisation des ressources, rendement et qualité sont donc le bilan de la facilitation et de la compétition (*Figure 1*).

Lorsqu'on conçoit les associations pour que les plantes exploitent des niches écologiques différentes, le mélange va utiliser les ressources disponibles plus efficacement que les cultures pures. Les cultures associées ont donc souvent une productivité par unité de surface plus importante que les cultures pures (Lithourgidis *et al.*, 2011, Malézieux *et al.*, 2009), ce qui se mesure couramment par un indicateur, le LER (Land Equivalent Ratio) (Mead et Willey, 1980). Cependant, dans le cas des couverts pérennes, il existe une différence majeure avec les associations culturales impliquant deux cultures à valeur marchande directe, qui ont fait l'objet de la plupart des recherches dans ce domaine (les associations de type céréale-pois sont les plus étudiées). Les couverts pérennes ne sont pas des cultures à proprement parler car ils sont là avant tout pour fournir des services à la culture de vente ou au système dans son ensemble (même si une valorisation économique peut être envisagée dans certains cas). On n'utilisera donc pas les indicateurs développés pour les associations de

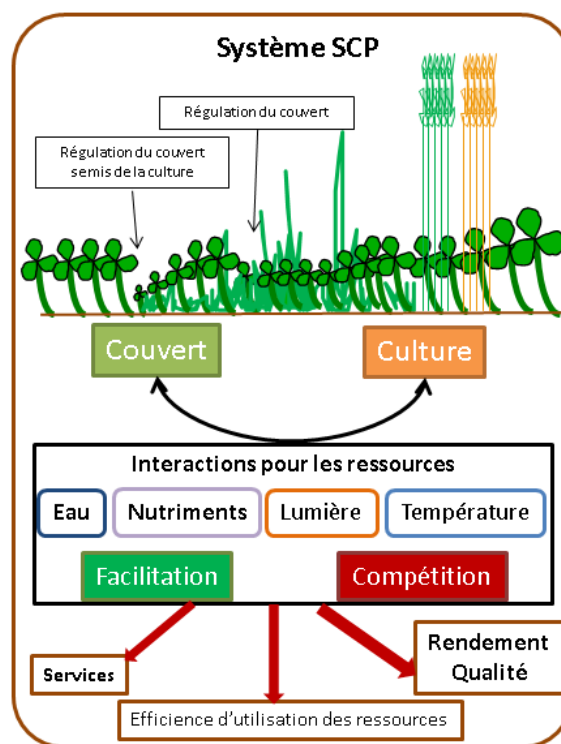


Figure 1 : Interactions entre le couvert et la Culture

cultures de vente car ici la culture de vente est souvent la seule espèce de l'association qui apporte un revenu.

Ceci signifie qu'il est important que la présence du couvert n'affecte pas négativement la culture de vente. Une des grandes problématiques liée à l'intégration de couverts pérennes est de comprendre les mécanismes de la compétition afin de mettre en place la conduite qui permet de les minimiser, tout en bénéficiant des effets positifs.

2) Impacts sur la productivité des cultures

Les interactions directes entre le couvert et la culture peuvent se traduire par des modifications du rendement de la culture et/ou des modifications de la qualité de la récolte. Une analyse des résultats disponibles dans la bibliographie permet de donner une idée générale de ces modifications en comparant au témoin sans couvert. La revue de bibliographie sur céréales d'hiver est présentée sous forme de tableau en *Annexe 2*. Sur 19 essais analysés et retenus, par rapport au témoin sans couvert, le rendement est inférieur dans 9 cas, équivalent dans 5 cas et supérieur dans 5 autres cas. La plupart des publications présentent des résultats avec un couvert implanté l'année de l'essai ou l'année précédente.

Les résultats disponibles sont très variables, mais **on note globalement une diminution du rendement liée à l'utilisation d'un couvert pérenne**, jusqu'à parfois une perte quasiment totale de la récolte. Dans sa synthèse basée sur des essais français, Véricel, (2010) fait état de rendements de 30 à 90 % sur blé, comparé à la culture sur sol nu. Cependant, **certaines expériences montrent qu'il est possible de conserver un rendement équivalent au témoin sans couvert, voire supérieur dans de rares cas** (Labreuche (communication personnelle, [1,2]¹), David Mennegaux, in Waligora, 2014 ; Bergkvist, 2003a, [3] ; Bergkvist, 2003b). Pour une culture et un sol donné, les résultats dépendent énormément de l'espèce utilisée en couvert, de son âge et de son mode de régulation, qui conditionnent sa compétitivité, ainsi que du climat. Dans l'ensemble, on observe que **des couverts bien régulés induisent des diminutions de rendement plus faibles** (par exemple, Carof, 2006).

Dans une même étude, des différences parfois importantes peuvent apparaître entre années et sites, ce qui indique qu'un couvert géré de manière identique peut avoir des impacts différents selon les conditions pédoclimatiques. Parfois, les auteurs parviennent à identifier la ressource principale expliquant les différences observées entre la culture seule et la culture associée au couvert. Dans la mesure où la plupart des essais se basent sur des systèmes de culture non optimisés par manque de connaissance et identifient des pistes pour de grandes marges de progression, ces résultats sont plutôt encourageants.

3) Impacts sur d'autres composantes du système

La qualité des produits est rarement évaluée, mais souvent, la compétition du couvert sur la culture réduit l'absorption de nutriments par la culture, ce qui se traduit non seulement par une baisse du rendement, mais aussi par une diminution de la teneur en protéines du grain. Quelques études sur céréales montrent qu'il est possible de bénéficier de fournitures azotées du couvert, ce qui conduit parfois à une augmentation de la teneur en protéines du grain sans baisse de rendement : ceci revient à une augmentation de la quantité d'azote contenue dans la récolte (Labreuche, comm. Pers. [1,2] ; Bergkvist, 2003a [3] ; Thorsted *et al.*, 2006a [4]).

¹ Les numéros entre crochets indiquent la position de la référence dans l'*Annexe 2* ou 3

Une synthèse bibliographique a été réalisée dans le cadre de ce stage pour évaluer les effets indirects du couvert sur d'autres composantes du système (*Annexe 4*). Elle a permis de mettre en avant les effets bénéfiques très marqués du couvert sur le contrôle de l'érosion ainsi que les organismes du sol. Un effet bénéfique est également observé sur la structure du sol, la production totale de biomasse et la stimulation des auxiliaires des cultures. En ce qui concerne les bioagresseurs, les résultats sont variables en fonction des espèces, le couvert pérenne peut en favoriser certains qui sont assez généralistes (par exemple *Sclerotinia*) et adaptés aux systèmes peu perturbés (limaces, rongeurs, adventices vivaces) et en réguler d'autres.

Une analyse complète des impacts du couvert sur le système de culture devrait se faire en prenant en compte les modifications que celui-ci engendre dans les pratiques culturales de l'agriculteur, qui seront évoquées dans les parties II) et III). Ainsi, en plus de ces impacts à l'échelle de la parcelle, l'intégration d'un couvert pérenne aura des impacts environnementaux car elle peut modifier le bilan des gaz à effet de serre, la quantité de produits phytosanitaires épandus et leur transfert, la biodiversité... Elle aura également des conséquences économiques, par la modification des charges, des produits et donc des marges, de la régularité des rendements et donc du risque pris par l'agriculteur. Certains aspects sociaux du système peuvent également être modifiés, comme le temps de travail, la reconnaissance ou le rejet par les pairs, etc. Le système étudié n'est pas encore suffisamment développé pour pouvoir analyser tous ces effets dans leur complexité.

B. Interactions trophiques et impacts sur les ressources

Afin de mieux comprendre quelles conditions sont favorables à la réussite d'une culture en SCP, une synthèse des impacts du couvert sur les principales ressources a été réalisée. Pour chaque ressource, nous donnons les attentes envers le couvert qui sont exprimées par les agriculteurs et les acteurs du développement agricole. Ensuite nous détaillons les mécanismes pouvant engendrer de la compétition (i.e. comment des facteurs limitants sont générés) et de la facilitation (i.e. comment des facteurs limitants sont levés) et dans quelles conditions.

1) Impacts sur les ressources souterraines

Les plantes d'une association peuvent être en compétition pour une grande diversité de ressources souterraines : l'eau et au moins 20 nutriments minéraux de taille moléculaire, valence, état d'oxydation et mobilité différents. La compétition souterraine diminue lorsque les niveaux de disponibilité des nutriments et de l'eau augmentent (Casper et Jackson, 1997), et la localisation des racines dans différentes zones du sol peut permettre d'éviter la compétition pour les nutriments (Evans, 1978)[5] ou l'eau (Zemenchik *et al.*, 2000).

Le semis direct **favorise la présence de mycorhizes**, et la présence d'un couvert également (Deguchi *et al.*, 2005 ; Deguchi *et al.*, 2007). Les hyphes externes des mycorhizes peuvent absorber et apporter à la plante mycorhizée les nutriments minéraux et l'eau provenant d'un plus grand volume de sol et éventuellement d'autres plantes. De plus, le couvert peut **améliorer l'implantation de la culture et l'exploration du sol par son système racinaire** via des effets bénéfiques sur la structure du sol ou la compétition précoce. Globalement, une association est capable d'explorer un volume de sol plus important que les cultures seules,

surtout si les deux espèces n'ont pas les mêmes types de systèmes racinaires (Hauggaard-Nielsen *et al.*, 2001).

a) La ressource en eau

On peut attendre du couvert qu'il limite l'évaporation de l'eau du sol sous la culture et pendant l'interculture, qu'il réduise le ruissellement et améliore l'infiltration.

Compétition :

Dans les cultures associées, l'acquisition de l'eau est liée à celle de la lumière. Le développement de la structure des parties aériennes détermine le partage des radiations interceptées et donc en grande partie la demande en eau pour l'évapotranspiration de chaque espèce de l'association (Ozier-Lafontaine *et al.*, 1998). Ceci est confirmé par Wiggans *et al.* (2012) qui affirment qu'un couvert pérenne ombragé transpire peu. Cela ne signifie pas qu'un couvert dominé par la culture ne peut pas exercer de compétition pour l'eau. Il continuera à prélever de l'eau, notamment si sa surface foliaire est importante (Ziyomo *et al.*, 2013).

Il existe peu de références sur les stress hydriques causés par un couvert pérenne à une culture d'hiver. Deux essais ont montré que l'eau n'était pas forcément limitante dans des climats tempérés si le couvert est régulé (Shili-Touzi, 2009[7] ; Carof, 2006 [8]). Cependant, plusieurs expériences recensées par Véricel (2010) ont fait apparaître sur blé une forte compétition pour l'eau dans des terres à faible réserve hydrique. Thorsted *et al.* (2006a [4]) et Thorsted *et al.* (2006b [9]) ont observé une compétition pour l'eau pendant le remplissage du grain avec un trèfle blanc, qui a conduit à un indice de récolte plus faible. La compétition observée est due à **l'acquisition d'eau par le couvert et à son évapotranspiration**.

Facilitation :

Il arrive que la présence du couvert améliore la disponibilité en eau pour la culture. Une voie de facilitation de la culture par un couvert peut consister en **l'amélioration de propriétés hydriques du sol**. Dans une luzerne pure, Rasse *et al.* (2000) ont observé une **augmentation de la conductivité hydrique à saturation** de 57 % par rapport à un témoin sol nu après un an et demi, attribuée essentiellement au renouvellement rapide des racines et à leur pivot puissant. Par son effet structurant, un couvert peut également **augmenter l'humidité à la capacité au champ** (Viloingt *et al.*, 2006).

L'avantage pour l'humidité du sol des SCP sur les systèmes avec labour a été mis en évidence pour la culture du maïs par Kurtz *et al.* (1952) et Jones *et al.* (1968) (dans Martin *et al.*, 1999). Les auteurs ont attribué ces différences à une **réduction de l'évaporation directe de l'eau du sol** des premiers centimètres - également observée par Viloingt *et al.*, (2006) - **et à une meilleure infiltration sous le couvert**. La réduction de l'évaporation directe de l'eau du sol serait induite par une diminution de la température du sol et du vent à la surface du sol et la meilleure infiltration serait due à un ruissellement limité par les obstacles que constitue le couvert. Dans ces études, le maïs associé a probablement moins prélevé d'eau du fait de son moindre développement, ce qui peut aussi expliquer en partie ces différences. Cependant, les effets mentionnés sont probablement effectifs de la même manière sous une culture de céréale.

Un autre phénomène pourrait participer à augmenter la fourniture d'eau à la culture, il s'agit de **l'effet « ascenseur hydraulique »** (Caldwell *et al.*, 1998). Il a été observé que la nuit,

les racines de certaines plantes déchargent 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. Corak *et al.* (1987) ont montré par une expérimentation en tubes de culture qu'une proportion importante de l'eau ainsi apportée par un plant de luzerne pouvait être transférée à un plant de maïs (la luzerne avait accès à de l'eau en profondeur, et le maïs avait accès à la partie supérieure du sol de la luzerne). Il semble que la présence des racines de maïs ait déclenché un abaissement du potentiel hydrique et donc le déchargement d'eau par la luzerne. Ce processus n'a pas été démontré pour la luzerne au champ, et les quantités d'eau ainsi apportées ne sont probablement pas suffisantes pour améliorer directement la croissance d'une culture comme le maïs, mais pourraient permettre un sursis à une culture en cas de sécheresse ou faciliter la minéralisation et l'acquisition de nutriments par les racines superficielles.

Dans le système sol, l'eau non valorisée par les plantes correspond à l'eau qui traverse la couche du sol où se trouvent des racines sans être prélevée et à l'évaporation de l'eau du sol. Ces deux composantes sont réduites par la présence d'un couvert pérenne (Ochsner *et al.*, 2010 [10], Liedgens *et al.*, 2004). Ainsi, une plus grande proportion de l'eau entrant dans le système participe à la production totale de biomasse : le couvert permet une **meilleure efficacité globale d'utilisation de l'eau**, même si nous avons vu que ceci s'accompagnait parfois d'une réduction du rendement de la culture de vente.

b) L'Azote

Les attentes que l'on peut avoir envers le couvert de légumineuse sont la fixation d'azote atmosphérique, sa mise à disposition pour les cultures, la réduction de la lixiviation de nitrates, la production d'une biomasse supérieure avec autant d'azote apporté.

La raison principale du choix de la famille des légumineuses pour assurer le rôle de couvert est leur capacité à fixer ce nutriment à partir du diazote gazeux présent dans l'air, grâce à la symbiose avec des bactéries du genre rhizobium dans les nodosités de leurs racines. Un couvert d'une autre famille botanique prélève dans le sol tout l'azote dont il a besoin.

Dans son expérimentation en région parisienne, Carof (2007 [8]) a apporté plus d'azote sur les associations graminée-blé que légumineuse-blé car il s'est basé sur la méthode du bilan. Une des trois années, il a dû tout de même apporter précocement un supplément de fertilisation azotée sur les associations graminée-blé car une carence azotée a été observée sur le blé. Ce résultat est conforme à beaucoup d'autres essais de ce type et incite à **préférer systématiquement un couvert de légumineuse** par rapport à une autre famille végétale.

Mélanger un couvert de légumineuse obtenant son azote de l'air et une culture obtenant son azote du sol permet une meilleure efficacité d'utilisation de l'azote grâce à la complémentarité de niches, c'est-à-dire qu'on peut produire plus de biomasse avec autant de fertilisation azotée ou autant de biomasse avec moins de fertilisation azotée. Ce mélange permet aussi la facilitation de la culture suivante grâce à l'azote présent dans les résidus.

La fixation symbiotique :

Une quantité d'azote minimale et un délai d'une dizaine de jours après la levée sont nécessaires à la mise en place de la fixation symbiotique (Stern, 1993 ; Corre-Hellou *et al.*, 2007). La fixation ne remplit donc pas les besoins au début de l'implantation de la légumineuse. En association orge-pois (semis simultané), Corre-Hellou *et al.* (2006) ont montré que la fixation commençait après le début de l'acquisition d'azote par les deux espèces. De plus, les légumineuses ont tendance à prélever l'azote du sol plutôt que de le fixer, lorsqu'il est disponible (Hartwig et Ammon, 2002). La fixation symbiotique n'aura donc lieu de manière importante que si la légumineuse éprouve un stress azoté. Ceci signifie qu'il y aura nécessairement une compétition pour l'azote entre la culture et la légumineuse de couverture si l'on attend du système un apport d'azote par fixation symbiotique. Cependant, le système racinaire de la majorité des cultures étant beaucoup plus compétitif pour l'azote que celui des légumineuses (Corre-Hellou *et al.*, 2007), l'effet sur la culture peut être extrêmement réduit.

Dans l'essai conduit par l'INRA à Grignon (Carof, 2006), la première année, tous les traitements ont été fertilisés de la même manière et l'INN (Indice de Nutrition Azotée) à floraison était de 0.47 avec légumineuse contre 0.72 en sol nu. Pourtant, à la fin du tallage, un effet fourniture d'azote par les légumineuses a été observé. Ceci montre que les couverts peuvent prélever ou fournir de l'azote selon leur régulation, les conditions pédoclimatiques et la période du cycle.

Les légumineuses fixent plus en culture associée qu'en monoculture (Corre-Hellou *et al.*, 2006), dans des ordres de grandeur de 20 à 30 % (Jean-Pierre Cohan, comm. pers.). L'effet est encore plus marquant en conduite bas-intrants, où la disponibilité de l'azote est davantage réduite (Corre-Hellou *et al.*, 2007). La fixation symbiotique est liée à la photosynthèse, ce qui signifie que si la compétition pour l'accès à la lumière est très rude, la fixation sera plus faible. Cardina et Hartwig (1988) ont observé une réduction du nombre de nodules chez des légumineuses ombragées, mais pas de leur activité. L'intensité de la réponse diffère selon les espèces, pour certaines, aucun effet de l'ombre n'a été rapporté (Stern, 1993).

Dans un mélange, la productivité de la légumineuse diminue avec des disponibilités précoces en azote croissantes car la compétitivité de la céréale augmente (Hinsinger, 2012, Naudin *et al.*, 2010). La régulation du couvert, qui réduit sa surface foliaire, va également réduire la fixation (Cuttle *et al.*, 2003). Une inhibition de la fixation symbiotique peut survenir pendant quelques jours suite à une élévation de la concentration en nitrates de la solution du sol au moment d'un apport azoté. Danso *et al.* (1991) ont mis en évidence que la fixation était plus réduite par l'apport d'azote chez le trèfle blanc que chez le lotier. Il serait intéressant de mieux connaître le comportement de la fixation symbiotique de légumineuses pérennes par rapport aux apports d'azote. Ces nombreux facteurs font qu'il faut s'attendre à ce que la fixation d'azote par un couvert soit inférieure à celle réalisée par la même plante conduite en prairie temporaire.

Facilitation

Les légumineuses apportent de l'azote au sol via leur système racinaire, ce phénomène est appelé **rhizodéposition d'azote**. Il provient de deux processus principaux : la décomposition des nodules et des racines (turnover en continu) et l'exsudation de composés azotés solubles (Fustec *et al.*, 2010). La rhizodéposition augmente avec la maturation des plantes car la dégradation des nodules et des racines en constitue la plus grande partie. En termes de quantités, les proportions de l'azote rhizodéposé sur l'azote total contenu dans la plante peuvent être très importantes : de 10 à 47 % en champ pour du trèfle souterrain et du trèfle blanc, respectivement, l'ornithope comprimé allant jusqu'à 57 % sous serre (McNeil *et al.*, 1997 ; McNeil *et al.*, 1998 ; Gylfadottir *et al.*, 2007, dans Fustec *et al.*, 2010).

L'importance de l'azote des racines dans la fourniture à la culture est souvent sous-estimée (Kumar et Goh, 2002 ; Herridge *et al.*, 2008). 34 à 68% de l'azote contenu dans les légumineuses fourragères se situerait dans leur appareil racinaire ou leurs stolons, c'est-à-dire dans les tissus situés en-dessous de la hauteur minimale possible pour la fauche (trèfle souterrain, ornithope comprimé, trèfle blanc et luzerne, Jorgensen et Ledgard, (1997) et autres publications, dans Herridge *et al.* (2008)). Ainsi, même dans le cas où les parties aériennes sont récoltées, les légumineuses peuvent apporter des quantités non négligeables d'azote dans le sol.

Dans les prairies pluriannuelles, le transfert d'azote fixé par les légumineuses aux plantes associées non fixatrices s'effectue en quantités plus importantes que dans les associations annuelles (Høgh-Jensen et Schjoerring, 2000). En revanche, on ne sait pas bien faire la différence entre le transfert direct (azote transféré depuis une plante vivante ou fixé durant la période de la culture bénéficiaire) et indirect (l'azote prélevé par la culture a été fixé avant la mise en place de la culture). Cette distinction a peu d'importance en SCP.

Dans une prairie sur un sol peu fertile, un trèfle violet a pu rhizodéposer 445 kg/ha et un trèfle blanc 160 kg/ha d'azote, dont 92 % provenait de la fixation symbiotique en un an d'association avec du ray-grass anglais (Høgh-Jensen et Schjoerring, 2001). Le transfert net d'azote vers le Ray-grass peut aller de 45 à 75 kg/ha/an pour du trèfle blanc et de 17 à 36 kg/ha/an pour le trèfle violet (Høgh-Jensen et Schjoerring, 2000). La fixation et le transfert d'azote depuis la légumineuse vers la culture sont plus élevés si les conditions sont limitantes en azote (Thorsted *et al.*, 2006c), ce qui incite à relativiser ces résultats.

Concernant les fournitures en azote dans les SCP, on rencontre des résultats contradictoires. (Sawyer *et al.*, 2010 [11]) ont conclu que le trèfle du Caucase n'a pas réduit les besoins en engrais azotés du maïs sauf dans un des 6 sites étudiés, alors que dans l'essai analysé par Berkevitch (2008, dans Ziyomo *et al.*, 2013) les besoins en azote du maïs sont presque entièrement remplis par les fournitures du trèfle.

Une réponse aux apports d'azote moins importante dans un blé associé à du trèfle blanc a été mise en évidence plusieurs fois (Bergkvist, 2003a [3] ; Jones et Clements, 2008). Bergkvist (2003a, [3]) a mesuré qu'un couvert de trèfle blanc augmentait la quantité d'azote minéral du sol par rapport au témoin sans couvert, surtout après une régulation par des herbicides. Jones et Clements (2008) ont mis en évidence une accumulation d'azote dans le sol année après année. Les blés associés à des légumineuses ont un INN plus élevé (en tendance), par rapport au témoin sans couvert, d'après Carof *et al.* (2007b [8]). Les restitutions d'azote des parties racinaires sont complétées par celles des parties aériennes lorsque celles-ci ne sont pas exportées.

La synchronisation entre la demande de la culture et les restitutions d'azote de la matière organique provenant des couverts (p. ex. les racines sénescentes) est essentielle pour limiter la lixiviation et améliorer la nutrition des cultures par facilitation. Les dynamiques des

restitutions d'azote par les légumineuses pérennes sont très peu connues, notamment lorsqu'elles sont régulées par des herbicides ou défoliées partiellement.

Au sujet des pertes d'azote, **la lixiviation est réduite** par un couvert pérenne par rapport à un couvert détruit, jusqu'à 75 % (Ochsner *et al.*, 2010). Cependant, en couvert d'interculture, l'efficacité des légumineuses pures est environ moitié moindre que celle des espèces non légumineuses (graminées, crucifères) (Justes *et al.*, 2012). L'avantage des couverts pérennes sur les couverts d'interculture est que le couvert est bien implanté dès la fin de la période où la culture prélève de l'azote. Il pourra donc empêcher la lixiviation engendrée par les orages de fin d'été, là où un couvert semé après déchaumage n'en sera pas capable, même s'il s'agit d'une graminée ou d'une crucifère pure. Une couverture du sol en continu réduit également le ruissellement et donc les **pertes par ruissellement** (Kaspar *et al.*, s. d.). Cependant, la directive nitrates interdit les couverts de légumineuses pures en hiver en zone vulnérable. Il reste à définir au niveau légal si un couvert pérenne bien implanté pourrait avoir le même statut qu'une prairie temporaire de légumineuse ou qu'une culture en dérobée.

En ce qui concerne les autres nutriments, le couvert prélève ceux dont il a besoin dans le sol, il entre donc en compétition avec la culture, mais il peut aussi favoriser la disponibilité de nutriments pour la culture par divers mécanismes. Ceux-ci sont présentés en *Annexe 5*.

2) Impacts sur les ressources aériennes : la lumière

On attend du couvert qu'il capte la lumière qui n'est pas interceptée par la culture dans plusieurs buts : empêcher la levée et la croissance d'adventices sous la culture mais aussi pendant l'interculture et contribuer à produire plus de biomasse par hectare et par an.

Compétition

Dans un couvert plurispécifique les plantes partagent la ressource lumineuse, selon leur hauteur, leur densité, leur LAI (Leaf Area Index : indice foliaire), leur disposition (inclinaison des feuilles, répartition du LAI dans les étages...). La compétition pour la lumière consiste en la **diminution de la quantité de rayonnement photosynthétiquement actif disponible pour la culture**. Il existe peu d'études dont le dispositif a permis de distinguer la compétition pour la lumière de la compétition souterraine. Sur céréales, le nombre de talles par plante (et donc le nombre de grains par mètre carré) est réduit par la compétition précoce sur la lumière. Il s'agit de l'un des facteurs les plus importants pour expliquer la réduction du rendement causée par le couvert dans plusieurs études (Hiltbrunner, *et al.*, 2007a [12], Shili-Touzi, 2009, Carof *et al.*, 2007a [8]). Le couvert peut réduire la surface foliaire du blé, même si le blé est plus haut que le couvert. En effet, dans l'étage de végétation où les deux espèces sont présentes, le couvert peut dominer la culture.

La dynamique temporelle est essentielle, car l'espèce qui capte le plus de rayonnement acquiert un avantage qui peut lui permettre de se maintenir en position de supériorité. En présence d'ombre, certaines légumineuses sont tolérantes (Van Sambeek *et al.*, 2007), d'autres auront des réactions indésirables correspondant à des stratégies d'évitement : croissance des tiges et des pétioles, réduction des ramifications (Lambers *et al.*, 2008).

Enfin, l'efficacité d'utilisation de la lumière est améliorée par la présence d'un couvert : dans les SCP, le rayonnement global est mieux capté, à l'interculture mais aussi en début et en fin de cycle de la culture (Ghiloufi *et al.*, 2010 ; Shili-Touzi, 2009). Ceci induit une augmentation de la biomasse totale produite et un meilleur contrôle des adventices.

4) Bilan des interactions

Les principales interactions pour les ressources sont synthétisées sur la *Figure 2*. Certains auteurs citent les ressources souterraines comme le terrain principal de la compétition exercée par un couvert pérenne, d'autres citent la compétition pour la lumière. Il semble que la compétition souterraine soit importante dans les milieux où les ressources souterraines sont limitées, et que dans le cas contraire, le facteur limitant sera la compétition pour la lumière. Ceci est en accord avec la loi générale énoncée par Tilman (dans (Casper et Jackson, 1997) qui annonce que dans un environnement plus productif, il y aura une augmentation du ratio compétition aérienne/compétition racinaire mais pas de la compétition globale.

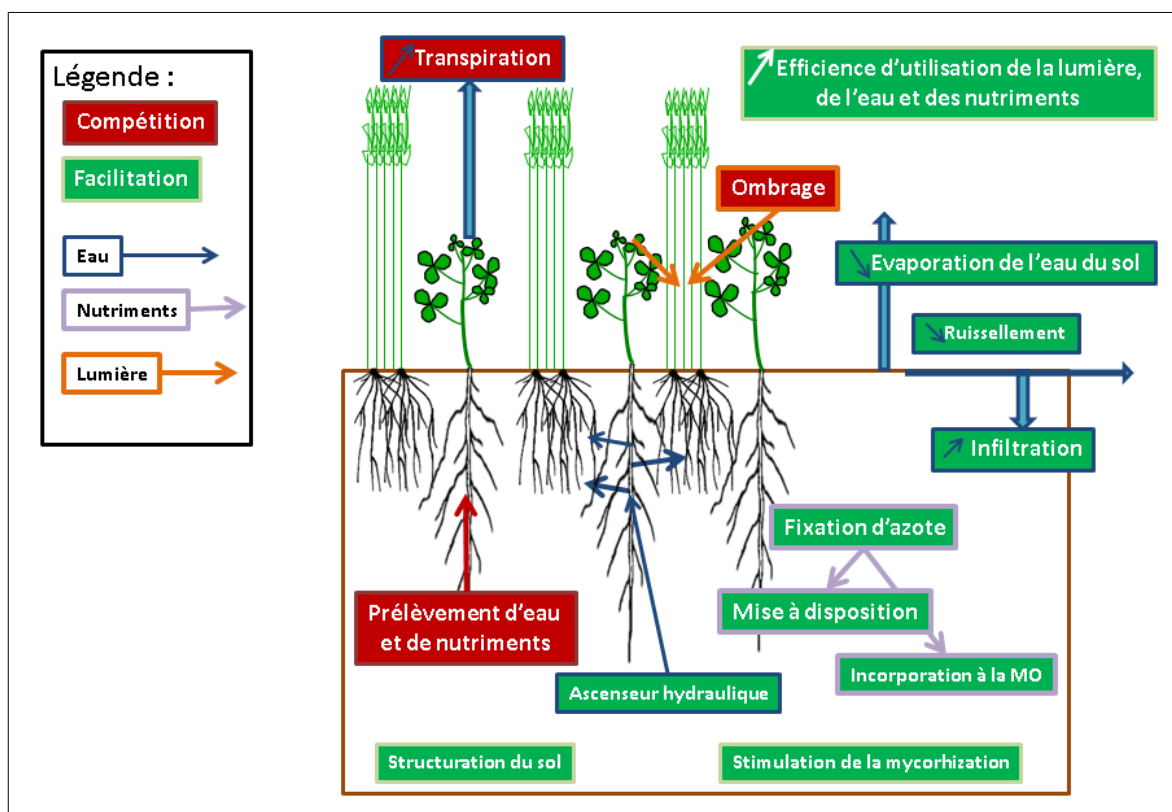


Figure 2 : bilan des interactions pour les ressources

En conclusion, la compétition pour les ressources peut être un facteur majeur de perte de rendement si le couvert les prélève durant les périodes où la culture est sensible à un manque, c'est-à-dire si ces périodes coïncident avec celles où il a également des besoins élevés. La couverture permanente du sol par une légumineuse a globalement un effet bénéfique sur le contenu en eau du sol dans les périodes où le couvert ne prélève pas de grandes quantités d'eau, sur la fourniture d'azote sous certaines conditions, sur la gestion des bioagresseurs et le contrôle des adventices. Le choix du couvert et sa gestion sont essentiels car ils déterminent sa pression sur les ressources (dans le temps et dans l'espace) et ses effets bénéfiques. La complémentarité de niches peut limiter la compétition, améliorer l'efficacité d'utilisation des ressources et promouvoir la facilitation.

II. Conception et conduite du système

A. Complémentarité entre le couvert et la culture

Dans le but de concevoir des systèmes dans lesquels la compétition entre la culture et le couvert est réduite et qui bénéficient au mieux de la facilitation et des autres bénéfices, plusieurs leviers sont envisageables. Ils reposent sur la complémentarité de niches entre la culture et le couvert et sont synthétisés dans le *Tableau 1* ci-dessous.

Tableau 1 : Type de complémentarité entre le couvert et la culture et leviers d'action

Type de complémentarité	leviers	facteurs à prendre en compte
Complémentarité dans le temps : que les espèces n'exercent pas de pression sur les ressources aux mêmes périodes, que les stades de sensibilité de la céréale ne correspondent pas aux périodes de compétitivité du couvert, qu'elles utilisent les ressources pendant toute l'année	choix de l'espèce et de la variété du couvert et période d'implantation	périodes de pression sur les ressources dans l'année
	dates de régulation du couvert	ajustement des périodes de pression sur les ressources
	choix de la variété de la culture et date de semis	précocité : périodes et intensité de la sensibilité aux stress, pouvoir couvrant, compétitivité du système racinaire
	intensité de la fertilisation	dose totale et fractionnement des apports (ex. : effet starter)
Complémentarité dans l'espace : que les espèces n'exercent pas de pression sur les ressources aux mêmes endroits, qu'elles utilisent les ressources dans tout l'espace dont elles disposent	choix de l'espèce et de la variété du couvert, de la variété de la culture	port et hauteur maximale, type et profondeur du système racinaire
	densité et positionnement du semis	largeur de rangs, rangs séparés ou semis perpendiculaire des deux espèces
	choix de la variété de la culture	hauteur de paille, compétitivité du système racinaire
	localisation de la fertilisation	apport en plein ou sur le rang de la culture

B. Choix du couvert

Il apparaît que le choix de l'espèce et de la variété du couvert sont essentiels dans la conception du système. Une synthèse des caractéristiques des espèces de légumineuses pérennes a été réalisée dans le but de mieux les connaître. Les critères de choix de l'espèce et de la variété du couvert sont résumés dans le *Tableau 2* ci-après.

Tableau 2 : Critères de choix du couvert pérenne

adaptation aux conditions de culture	climat et sol préférentiels
	résistance à la compétition sous la culture
praticité technique	pérennité
	gène potentielle à la récolte de la culture
	facilité de régulation (chimique ou mécanique)
	facilité d'implantation avec une des cultures de la rotation
	adaptation à un maximum de cultures de la rotation
	absence d'effet favorable sur des bioagresseurs
compétitivité sur la culture et complémentarité	précocité de démarrage au printemps
	dynamique de la croissance dans l'année
	port et hauteur maximale
	type et profondeur du système racinaire
	tolérance de la fixation symbiotique à l'azote du sol
production de services	niveau de biomasse produite
	niveau de fixation azotée
	compétitivité sur les adventices
	régulation de bioagresseurs
	effet sur la structure du sol
	efficacité de régulation de l'érosion
	possibilité d'une fauche pour une valorisation

Les résultats montrent qu'il existe une variabilité importante au sein des espèces et variétés de légumineuses pérennes en ce qui concerne les traits fonctionnels qui font qu'elles sont adaptées ou non à un SCP dans un contexte donné. Par exemple, la luzerne a un port dressé, un système racinaire pivotant profond et une croissance forte l'été alors que le trèfle blanc a un port étalé, un système racinaire superficiel, se diffuse par stolons et se développe peu les étés secs.

A un niveau plus fin, Humphries *et al.*, (2004) ont étudié l'association de blé avec de variétés de luzerne avec dormances hivernales différentes et ont conclu que les plus dormantes réduisent moins le rendement du blé. De même, Den Hollander (2012) a montré qu'il existait de grandes différences entre espèces et variétés de trèfle par rapport à leur capacité à entrer en compétition avec une culture. Ceci montre le potentiel d'amélioration génétique disponible pour la sélection de couverts dans le but de les associer avec des cultures, même s'il est illusoire de penser que l'on pourra créer un couvert dont toutes les caractéristiques sont favorables.



Figure 3 : luzerne à port rampant (Mauriès, 2003)

Le problème majeur est que mis à part certaines variétés de trèfle blanc voire de luzerne conçues pour être utilisées en gazon, il n'existe pour les SCP que les variétés conçues pour la production de fourrage et donc trop compétitives pour les cultures.

La sélection en utilisant des croisements avec des types génétiques conservés pour des particularités peu utiles en production fourragère, comme la luzerne à port rampant conservée dans la collection de

l'INRA de Lusignan (*Figure 3*, Mauriès, 2003), pourrait apporter de grands progrès. L'implication des sélectionneurs sur ce marché de niche probablement porteur sera sans doute déterminante pour l'adoption du système par plus d'agriculteurs.

C. Régulation du couvert

La synthèse bibliographique a montré que les essais où le rendement de la culture était préservé voire amélioré sont ceux où le couvert est par nature peu compétitif ou ceux où il est régulé. La **régulation du couvert** est capitale afin de maîtriser la compétition qu'il exerce sur la culture, au moins tant qu'il n'existe pas de variétés sélectionnées spécifiquement pour les SCP. Elle peut s'effectuer avant le semis de la culture par une fauche ou un travail du sol (léger ou en bandes), au début du cycle de la culture par le passage d'un outil de désherbage mécanique, ou par l'emploi de doses réduites d'herbicides qui stoppent la croissance du couvert pendant une période et éventuellement vrillent les tiges, réduisant ainsi sa hauteur. Les avantages et inconvénients de chaque technique sont synthétisés dans le *Tableau 3*. En plus de réduire grandement la compétition exercée par le couvert, la régulation peut permettre de rendre disponible de l'azote par la sénescence et la décomposition de parties aériennes de la légumineuse. L'effet des herbicides utilisés ou d'un passage d'outil sur les ressources souterraines est mal connu. Il serait très intéressant de savoir si un couvert de légumineuse régulé par un herbicide continue à fixer de l'azote et à extraire de l'eau, si des nodules et des racines entrent en sénescence, si cela induit une consommation d'azote du sol lors du redémarrage, etc.

Afin de bien positionner les opérations de régulation du couvert, il est essentiel de connaître la dynamique de croissance de celui-ci, mais aussi les stades de sensibilité de la culture à la compétition. L'acquisition de références par la recherche et d'expérience par les agriculteurs est nécessaire, également parce que l'efficacité de la régulation dépend de l'espèce du couvert, de son âge et éventuellement de sa hauteur et de son enracinement.

Tableau 3 : Avantages et inconvénients des deux méthodes de régulation du couvert

	avantages	inconvénients
régulation mécanique	pas d'usage d'herbicide	demande du temps et du matériel adapté
	désherbage simultané	Faible efficacité (risque de dynamiser le couvert ?)
	Libération d'azote par minéralisation de parties tuées du couvert	peut favoriser la levée d'adventices
régulation chimique	opération rapide	manque de produits homologués sur certaines cultures
	méthode très efficace (sous réserve de bonnes conditions et de bon choix du produit et de la dose)	difficulté de choix du produit et de la dose, peu de molécules efficaces sur les légumineuses dans les cultures
	opération possible tard dans le cycle de la culture	incohérence avec la volonté de réduire l'usage des herbicides
	peut permettre un désherbage simultané	certaines molécules pourraient impacter la fixation d'azote ?

III. Etude expérimentale et discussion

Afin de contribuer à la recherche de réponses aux questions soulevées par la pratique de SCP sur le terrain, 4 expérimentations en plein champ ont été mises en place par Arvalis-Institut du Végétal sur la station de Boigneville lors de la saison 2013-2014. Deux de ces essais ne sont qu'évoqués ici, car ils n'ont pas fait l'objet d'un suivi aussi détaillé dans le cadre du stage. Le premier, l'essai « *Screening de couverts* » consiste en une collection de 26 couverts de légumineuses d'espèces et variétés diverses semés au printemps 2014 et dans lesquels du blé sera semé à l'automne 2014, dans le but d'observer des couverts mal connus, leur comportement par rapport à la conduite pratiquée et leurs impacts sur le blé. Le second, l'essai « *Conduite herbicides* » a permis d'acquérir des références sur les molécules et doses d'herbicides utilisables pour réguler cinq espèces de couverts de légumineuse sous blé, avec 27 modalités herbicides ([14 matières actives]*[2 ou 3 doses à la date adaptée au produit]) et des témoins non traités. Les deux autres essais sont décrits en détail dans ce rapport.

A. Matériels et Méthodes

Les essais ont été mis en place sur les limons argileux sur calcaire de la station de Boigneville (coordonnées 48°19'27.1"N 2°22'58.0"E, à 115 m d'altitude). La pratique des SCP étant assez nouvelle pour l'institut, ces essais visent aussi bien à progresser dans la maîtrise technique qu'à évaluer les impacts du couvert. L'objectif est de comparer les impacts de différents couverts et de la conduite de l'association en se basant sur l'hypothèse que les couverts peuvent avoir alternativement un effet positif ou négatif sur la culture de vente via leurs effets sur la disponibilité des ressources. Dans chacun des deux essais, une placette non fertilisée a été réalisée sur chaque parcelle élémentaire. La modalité fertilisée sera appelée « dose X » et la modalité témoin (non fertilisée) sera appelée « T₀ ».

1) Essai « Trèfle Blanc sous Blé Tendre d'Hiver » (TBSSBTH)

Le premier essai, TBSSBTH, met en œuvre une culture de blé tendre d'hiver (variété Pakito) associée à un couvert pérenne de trèfle blanc intermédiaire (variété Aberdai) (modalité blé associé) ou sans trèfle blanc (modalité témoin blé seul), avec 3 blocs (soit 3 répétitions par modalité).

Le détail des opérations culturales est présenté en *Annexe 6*. Le trèfle blanc a été semé en août 2012 sur trois bandes de 17 m de longueur réparties dans la parcelle. Une culture de maïs grain a été implantée en avril 2013 et récoltée le 31 octobre 2013 (résultats et commentaires en *Annexe 7*). Le trèfle est resté vivant sous le maïs grain, et le blé a été semé le 27 novembre 2013 en direct. Les dates des stades du blé sont présentées en *Annexe 8*. Le blé a été conduit de façon à éviter les facteurs limitants. 194 unités d'azote ont été épandues en mars en deux passages. Deux épandages d'herbicides ont été utilisés pour lutter contre les adventices et réguler le trèfle : 10 g/ha de produit Platform 40 WG le 12 mars et 1.4 L/ha de produit Chardol le 31 mars. Le blé a été récolté le 31 juillet.

2) Essai « Impacts des couverts »

Le deuxième essai, l'essai Impacts, met en œuvre une culture de blé tendre d'hiver (variété Pakito) associée à 7 couverts pérennes de légumineuses ou sans couvert (témoin sol nu), en 3 blocs (2 ou 3 trois répétitions selon la modalité). Dans cette étude, nous nous limiterons aux modalités « couvert » répétées 3 fois, présentées dans le *Tableau 4*.

Tableau 4 : modalités couvert de l'essai Impacts

Espèce de couvert (abréviation)	Variété	Densité de semis
Sol nu : aucun couvert, blé conduit seul (NU)		
Luzerne méditerranéenne (<i>Medicago sativa</i>) (LUZ)	Melissa : variété méditerranéenne	10.8kg/ha
Trèfle blanc (<i>Trifolium repens</i>) (TB1)	Haïfa : variété intermédiaire	3.3kg/ha

Le détail des opérations culturales est présenté en *Annexe 10* et un plan de l'essai est visualisable en *Annexe 11*. Le dispositif a été randomisé au sein de chaque bloc. Le bloc 3 est incomplet et permet aux seules modalités NU, LUZ et TB1 d'être répétées une troisième fois. Le précédent était une jachère depuis 2001, composée de graminées diverses, de trèfle blanc et de quelques vivaces. Après destruction chimique de la jachère (glyphosate 1080 g/ha et 2,4 D 600 g/ha) et labour le 5 juillet, les couverts ont été semés en combiné avec une herse rotative le 12 juillet. En septembre et octobre, les parcelles des modalités TB1 et NU ont reçu deux épandages de glyphosate à 1440 g/ha, et les parcelles LUZ ont reçu un épandage de glyphosate à 720 g/ha. Cette différence de traitement a été décidée car les parcelles TB1 et NU étaient envahies par une population importante d'adventices variées dont l'apparition a été liée à la couverture plus lente du sol par ces couverts et à l'absence de couverture du sol dans la modalité sol nu.

Le blé a été semé le 22 octobre en direct. Les dates des stades du blé sont présentées en *Annexe 12*. Il a été conduit de manière à éviter les facteurs limitants : 140 unités d'azote ont été apportées en mars en deux passages. L'essai a été désherbé en novembre au moyen de 2.5 l/ha de produit Trooper, en février au moyen du produit Harmony SX à 30 g/ha et en mars au moyen du produit Platform 40 WG à 10 g/ha. Le 31 mars, le produit Chardol a été épandu à 1 L/ha sur la modalité LUZ dans les blocs 1 et 2, afin de réguler ce couvert car il semblait qu'il allait reprendre une croissance importante. Le blé a été récolté le 31 juillet.

3) Méthodes employées pour les mesures et le traitement des données

Afin de comparer le comportement du blé avec les divers couverts et sur sol nu et d'expliquer en partie les différences observées, la méthode utilisée fait appel à l'analyse des composantes de rendement. Celles-ci donnent des renseignements sur la réalisation de chaque phase d'élaboration du rendement, et les différences observées entre les modalités de couvert permettent d'élucider des mécanismes de facilitation et/ou de compétition entre les espèces. L'ensemble des mesures effectuées au cours de la saison est présenté en *Annexe 9* pour l'essai TBSSBTH et en *Annexe 13* pour l'essai Impacts.

Ainsi, sur le blé, des mesures de nombre de plantes par m², nombre d'épis au m², poids de mille grains (PMG) et rendement ont été effectuées, complétées par des mesures de biomasse aérienne et de concentration en azote des parties aériennes à plusieurs stades. Le nombre de grains par m² et par épis ont été calculés à partir du PMG et du rendement (ceci constitue une faiblesse du dispositif de suivi, car on ne pourra pas se servir de ces variables pour expliquer les différences de rendement). La biomasse aérienne et la concentration en azote des parties aériennes des couverts ont également été mesurées. Certaines variables du milieu ont été mesurées pour compléter l'analyse. Le suivi réalisé a inclus des mesures de reliquat minéral azoté du sol et de tension de l'eau dans le sol (ce dernier étant mis en place uniquement dans l'essai Impacts). Les reliquats azotés ont été mesurés à des dates où l'azote contenu dans les parties aériennes des plantes a aussi été mesuré (culture, couvert, adventices). L'azote total présent dans le système sol-plantes à ces dates correspond à la somme des quantités d'azote mesurées. Ce calcul permet d'établir un bilan des flux d'azote entre les dates clés. La méthodologie employée pour les mesures expérimentales correspond aux modes opératoires utilisés en routine pour les essais de l'institut.

L'analyse statistique des données a été réalisée sous R (version 3.1.0). Pour toutes les données, un test ANOVA a été utilisé. L'écart-type résiduel (ETR) du modèle est indiqué. La modalité « couvert » et le bloc ont été utilisés comme facteurs. Un test de Student-Newman-Keuls a ensuite été réalisé pour séparer les modalités significativement différentes. Pour les mesures qui ont été réalisées également sur un témoin sans azote après le premier apport d'ammonitrate sur la modalité dose X, la dose d'azote apportée a aussi été utilisée comme facteur.

Dans l'essai Impacts, un passage de pulvérisateur sur sol non ressuyé à l'automne a détruit quelques rangs de blé dans les parcelles situées en bordure de l'essai. Une plus petite surface homogène et donc récoltable a été obtenue dans ces parcelles. Les rangs de blé restants ont été soumis à moins de compétition intraspécifique et ont donc eu accès à plus de ressources. Les rendements des parcelles concernées (101, 103 et 105, voir le plan en *Annexe 11*) ont donc été surévalués, l'effet était bien visible sur la cartographie des résidus du modèle. Nous avons donc décidé d'utiliser comme facteur supplémentaire dans l'analyse des données une covariable correspondant à ce problème d'absence de rangs. La covariable n'a été intégrée au modèle que lorsque son effet était significatif. Un test de Student-Newman-Keuls a ensuite été réalisé pour séparer les modalités significativement différentes. Le choix d'intégrer la covariable dans l'analyse implique que l'écart-type résiduel du modèle a diminué et que par conséquent, nous discernons plus facilement les effets des facteurs. Ainsi, pour cet essai, il est nécessaire de relativiser les résultats significatifs des analyses des données.

B. Résultats et Discussion

Pour deux raisons principales, les deux essais analysés constituent deux exemples - très différents et donc complémentaires - des interactions qui ont lieu entre une céréale d'hiver et son couvert associé. Premièrement, le **semis très tardif du blé de l'essai TBSSBTH** en direct dans les résidus de la culture de maïs grain a impliqué une densité de plantes réduite et un retard de stades par rapport à un blé implanté dans de bonnes conditions comme cela a été le cas dans l'essai Impacts. La biomasse du blé en sortie d'hiver beaucoup plus faible dans l'essai TBSSBTH en est une illustration. Deuxièmement, le trèfle blanc de l'essai TBSSBTH est implanté depuis plus d'un an et a pu être conservé vivant au-delà de la récolte du blé, alors que les couverts de l'essai Impacts avaient été implantés l'été avant le semis du blé et **n'ont pas survécu à la saison de culture**. En effet, le trèfle blanc TB1 a dépéri au cours du printemps : il a été d'abord très fragilisé par les fortes doses de glyphosate à l'automne et les autres applications d'herbicides employés pour le contrôle des adventices puis impacté par la compétition d'un blé dense. Le couvert de luzerne quant à lui était peu dense en sortie d'hiver, ce qui est peut-être lié au type méditerranéen de la variété. Il a finalement été tué courant avril par l'application de 2,4 D le 31/03. Le manque de recul sur la technique est la cause de ce choix peu judicieux.

1) Essai TBSSBTH : une perte de rendement liée au couvert

Nous avons observé dans cet essai une tendance à un rendement du blé plus faible lorsqu'il est associé au trèfle blanc durant l'ensemble de la saison (*Tableau 5*), de l'ordre de 16 q/ha. Le rendement du SCP représente donc 81 % de celui du témoin. Il semble que le PMG vienne compenser en partie un nombre de grains par m² probablement réduit (non mesuré).

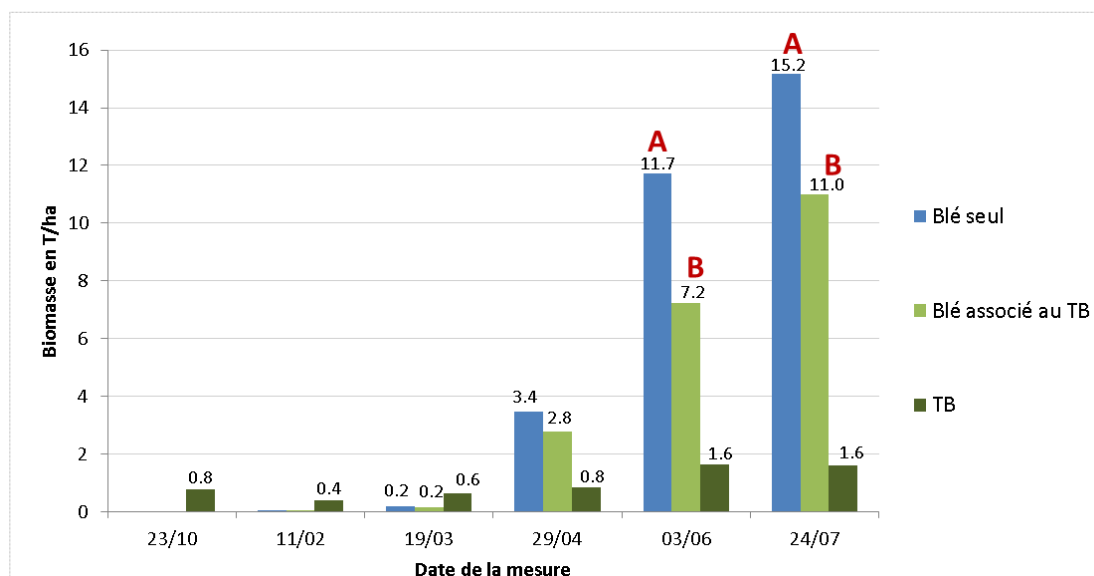
Tableau 5 : composantes de rendement du blé TBSSBTH

	Blé seul	Blé et TB	p-value	ETR
nombre de plantes par m ²	125.7	126.7	NS (p-value=0.98)	38.28
nombre d'épis par m ²	444.7	373.3	NS (p-value=0.13)	34.64
nombre de grains par épi	36.57	34.19	NS (p-value=0.20)	1.49
nombre de grains par m ²	16133 (A)	12565 (B)	0.084	1352
PMG (g)	45.91 (B)	48.86 (A)	0.055	0.882
rendement (q/ha)	74.08 (A)	61.33 (B)	0.10	5.447

Les lettres représentent les moyennes significativement différentes au seuil de 10%. NS : non significatif. Le nombre de grains par épi et le nombre de grains par m² n'ont pas été mesurés mais calculés à partir des variables mesurées.

En ce qui concerne les variables explicatives, la quantité d'azote du sol en sortie d'hiver n'était pas différente entre les modalités (33.3 kg/ha, p-value=0.99). En revanche, la quantité totale d'azote contenue dans le système sol-plantes était de 40.3 kg/ha avec trèfle contre 34.4 kg/ha pour le blé seul (p-value=0.015). Le trèfle a donc apporté de l'azote au système, mais en quantité limitée.

Figure 4 : Biomasses des blés et du trèfle au cours de la saison



Les lettres représentent les valeurs significativement différentes au seuil de 10%. Les comparaisons entre biomasses du blé aux autres dates ne montrent pas de différence. L'axe horizontal ne représente pas l'échelle temporelle.

Le suivi des biomasses présenté en Figure 4 révèle que la biomasse du trèfle n'a jamais dépassé 1.6 T/ha. Pour autant, un effet sur la biomasse du blé est observé à partir de la floraison. Le trèfle avait une biomasse supérieure au blé en sortie d'hiver et au stade épi 1 cm, on peut donc supposer qu'une compétition pour la lumière a pu avoir lieu dans l'étage inférieur de la végétation (le blé avait tout de même une hauteur supérieure au trèfle. Données non présentées).

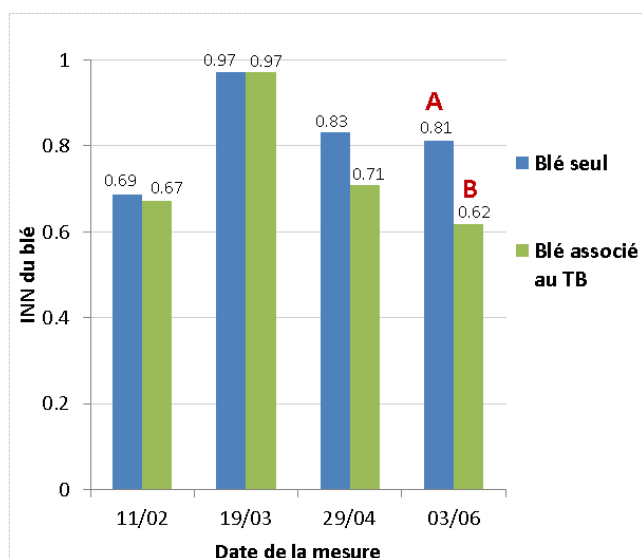


Figure 5 : Indices de nutrition azotée des blés

Les lettres représentent les moyennes significativement différentes au seuil de 5%. Les comparaisons aux autres dates ne montrent pas de différence. L'axe horizontal ne représente pas l'échelle temporelle.

Le suivi de l'état de nutrition azotée du blé (Figure 5) révèle qu'une **carence en azote au moment de la floraison** a pu être la cause d'une réduction du nombre de grains par m² par un avortement de fleurs (Gate et Giban, 2003). Il apparaît donc que le trèfle a exercé une compétition pour la ressource en azote.

Ainsi, dans cet essai, le maintien du couvert a eu des conséquences lourdes sur le rendement du blé car celui-ci était peu compétitif. L'effet très compétitif d'un trèfle blanc insuffisamment régulé a déjà été observé à plusieurs reprises (Hiltbrunner *et al.*, 2007, Bergkvist, 2003a, Thorsted *et al.*, 2006b). Ici, il semble que ce soit avant tout le faible pouvoir couvrant du blé qui a favorisé le bon développement du trèfle et donc la

compétition qu'il a exercée sur le blé. L'observation des placettes sans azote – dans lesquelles le blé est très peu compétitif – confirme cette hypothèse (données non présentées). La douceur de l'hiver pourrait y avoir contribué en ne freinant pas la croissance du trèfle. De plus le trèfle est une espèce non dormante.

2) Essai Impacts : un faible effet du couvert sur le blé

Pour l'ensemble des composantes du rendement et le rendement lui-même, les différences observées entre TB1, LUZ et NU sont minimales (*Tableau 6*). Ceci signifie que les couverts n'ont pas eu un fort impact sur le développement du blé. A partir du semis du blé, nous n'avons pas mesuré de biomasse des couverts supérieure à 0.42 T/ha (données non présentées).

Tableau 6 : Composantes du rendement du blé Impacts

	NU	TB1	LUZ	p-value	ETR	covariable
nombre de plantes par m ²	219.6 (A)	207.8 (AB)	192.6 (B)	0.075	11.13	non
nombre d'épis par m ²	533.5	541.4	520.2	NS (p-value=0.88)	51.30	non
nombre de grains par épi	38.86	40.12	39.11	NS (p-value=0.92)	4.05	oui
nombre de grains par m ²	17554 (B)	18325 (A)	17293 (B)	0.0069	1161.6	oui
PMG (g)	48.30 (B)	49.09 (AB)	49.43 (A)	0.062	0.410	non
rendement (qt/ha)	99.67 (B)	105.87 (A)	100.15 (B)	0.018	1.328	oui

Les lettres représentent les groupes significativement différents au seuil de 5% (10% pour le PMG et le nombre de plantes par m²). Le nombre de grains par épi et le nombre de grains par m² n'ont pas été mesurés mais calculés à partir des variables mesurées.

Le rendement du blé conduit avec le couvert de trèfle blanc est supérieur à celui obtenu sur sol nu. Ce résultat est cependant à relativiser du fait du faible écart et de l'utilisation de la covariable qui augmente la puissance de test. Le nombre de plantes par m² n'a pas été un facteur limitant car la levée était bonne dans toutes les modalités et le blé est capable de compenser par le tallage les écarts minimes observés. La différence de rendement en faveur du trèfle blanc pourrait s'expliquer par le cumul de tendances sur le nombre de grains par épis (non mesuré) et le PMG. Le couvert de luzerne n'a pas eu d'effet sur le rendement du blé.

En ce qui concerne les variables explicatives, on observe des différences entre couverts au moment du semis du blé et en sortie d'hiver.

Tableau 7 : variables explicatives du rendement du blé

	Stade du blé	NU	TB1	LUZ	p-value	ETR
azote du sol	semis	130 (A)	Non mesuré	55 (B)	0.02017	13.25
azote total		130 (B)	Non mesuré	179.24 (A)	0.01113	6.417
azote du sol	tallage	78	63.33	50.67	NS(p-value=0.103)	11.52
azote total		98.97	87.18	83.4	NS (p-value=0.49)	15.25
réserve hydrique (mm)		302.9	314.6	317.3	NS (p-value=0.12)	6.72
biomasse du blé		0.70 (B)	0.47 (C)	0.92 (A)	0.00645	0.081
INN		0.68 (B)	0.90 (A)	0.60 (B)	0.02247	0.080
biomasse du blé (X)	épi 1cm	1.93	1.90	2.03	NS (p-value=0.92)	0.43
INN		1.06	0.99	1.01	NS (p-value=0.79)	0.11
biomasse du blé (X)	maturité	22.3	20.4	18.2	NS (p-value=0.43)	3.5
biomasse du blé (T0)		16.5	14.6	12.2	NS (p-value=0.18)	2.2

Biomasse du blé en T/ha, quantités d'azote en kg/ha. Les lettres représentent les groupes significativement différents au seuil de 5%

Par rapport au témoin (sol nu), le couvert de luzerne a eu un impact positif sur la biomasse du blé en sortie d'hiver alors que le trèfle blanc aurait eu l'effet inverse. Pour la luzerne, ceci semble pouvoir s'expliquer par une quantité d'azote total au semis plus importante : la luzerne aurait apporté environ 50 kg/ha d'azote au système (contenus dans sa biomasse), probablement par fixation symbiotique et par réduction de la lixiviation. Cet azote a pu se minéraliser après la destruction des parties aériennes de la luzerne et être absorbé par le blé durant l'hiver. En revanche, en sortie d'hiver, l'azote fixé par la luzerne n'était apparemment pas encore minéralisé.

Le déficit azoté illustré par la différence d'INN entre les blés au stade tallage a pu influencer légèrement l'émission des talles et donc le nombre d'épis par m² (Gate et Giban, 2003) mais l'apport d'azote début mars a dû compenser le léger déficit observé.

Par la suite, aucune différence significative n'a été mesurée sur les biomasses du blé. Il semble que l'avantage fourni au blé par la luzerne en sortie d'hiver n'a pas duré, au contraire, la luzerne aurait plutôt induit un effet négatif sur le blé en fin de cycle. Ceci pourrait s'expliquer par un effet de ce couvert sur l'eau du sol. On sait qu'un stress hydrique courant montaison réduit le nombre de grains par m² (Arvalis-infos, 2013). Or, la réserve en eau du sol semble avoir été moins élevée dans les parcelles ayant hébergé le couvert de luzerne, notamment lors de la montaison, mais le dispositif de suivi n'a pas permis d'identifier d'effet significatif à la date du 23/04 (date à laquelle apparaît un déficit dans le blé associé à la luzerne, p-value=0.44) (Figure 6).

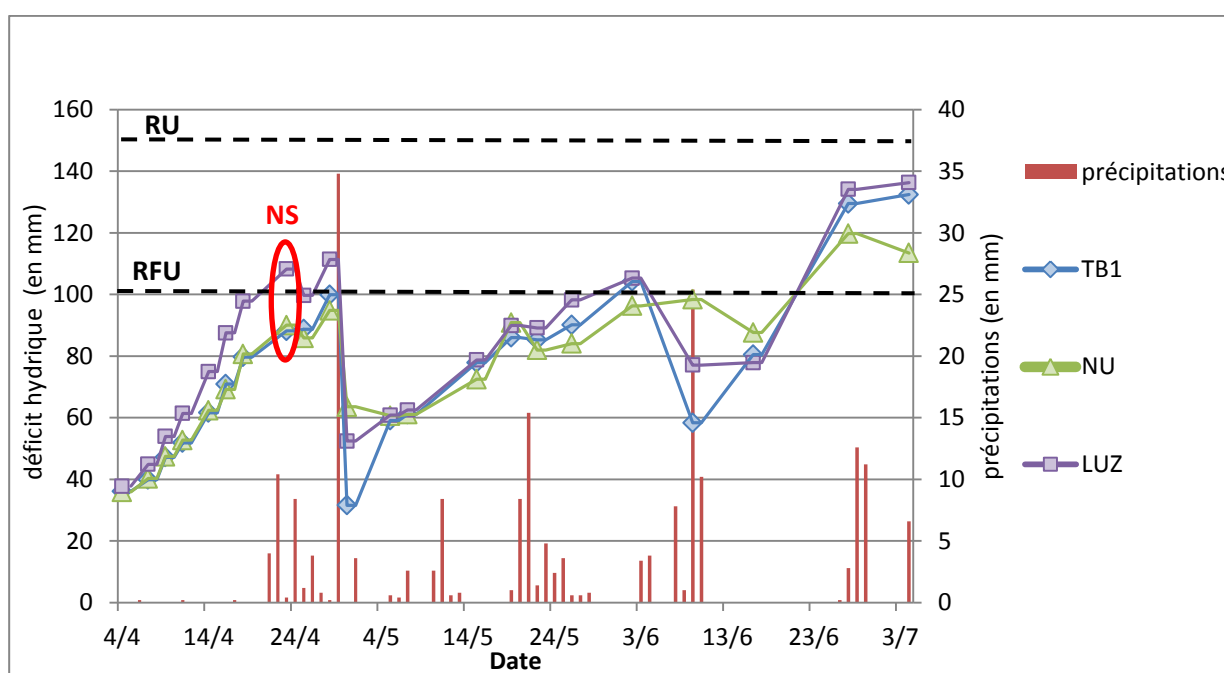


Figure 6 : Estimation du déficit hydrique de la Réserve Utile du sol de 0 à 75 cm et précipitations

RU : Réserve Utile estimée ; RFU : Réserve Facilement Utilisable estimée

Ainsi, les différences observées au début du cycle du blé auraient été peu à peu gommées par d'autres effets et par la capacité du blé à opérer des compensations entre ses composantes de rendement. Cet essai qui visait initialement à comprendre les impacts des couverts aura finalement plus appris sur la conduite du système. Il aura permis une évaluation provisoire d'un système de culture encore mal maîtrisé.

3) Limites des essais

Les résultats obtenus sur les impacts du couvert sur la culture sont à relativiser du fait de la destruction des couverts et du manque de précision des essais à cause de leur hétérogénéité. Celle-ci est due au précédent jachère et au labour dans l'essai Impact, et aux résidus de maïs inhomogènes dans l'essai TBSSBTH. Elle implique que la puissance des tests statistiques est faible, donc le suivi réalisé ne permet pas d'expliquer finement les mécanismes mis en jeu dans les interactions entre espèces. Peut-être que les essais mettant en jeu des couverts pérennes doivent être mis en œuvre avec une méthodologie encore plus contraignante que dans les essais factoriels étudiant une seule espèce. Par exemple, il faudrait réaliser ce type d'essais sur des parcelles plus grandes afin de pouvoir augmenter le nombre de répétitions ou de mesures dans le temps. Dans l'essai Impacts, la mesure de biomasse prévue à floraison du blé n'a pas pu être réalisée à cause de la surface trop restreinte des parcelles. Une mesure de densité des couverts en plantes par m² aurait pu être complémentaire des mesures de biomasse. Les enseignements de l'essai TBSSBTH auraient été encore plus riches s'il avait mis en œuvre un suivi de la compétition du couvert pour la lumière tel que celui présenté par Carof *et al.* (2007b) ou par des mesures de hauteur des plantes à la sortie de l'hiver, ainsi qu'un suivi de l'eau du sol.

4) Principaux enseignements

La différence très importante entre les deux essais signifie que l'analyse des résultats de façon conjointe est enrichissante. Dans un blé semé tard et dans les conditions de Boigneville cette année, le taux de levée est réduit. De plus, le tallage est retardé et il intervient alors pendant la période où le trèfle est en croissance. La compétition exercée sur le blé induit un tallage réduit et le trèfle gagne alors encore en compétitivité. Il aurait sans doute fallu réguler le trèfle à la fin de la montaison du blé. L'observation de ce « cercle vicieux » nous apprend que les conséquences de la moindre erreur de pilotage du système peuvent être grandes et se traduire par une perte de rendement. La plus grande stabilité de rendements observée dans les associations culturales est ici fortement remise en question en ce qui concerne les SCP.

L'implantation du blé de l'essai Impacts s'est déroulée dans de bien meilleures conditions et il s'est avéré très compétitif sur les couverts en sortie d'hiver. Cet effet de la date de semis sur la compétitivité du blé associé à un trèfle blanc est peu évoqué dans les articles étudiés. En revanche, l'effet de la densité de semis du blé est assez bien connu (Hiltbrunner et al., 2007c, Thorsted et al., 2006b).

Bien que l'implantation du blé ait été clairement différente dans les deux essais, il faut garder à l'esprit qu'en comparant les résultats, on compare l'effet de systèmes de cultures différents et non de quelques facteurs, avec ce que cela implique de complexité et donc de prudence dans l'annonce de résultats. Il est probable que la différence d'impact du couvert observée entre les essais soit aussi due à la régulation beaucoup plus intense des couverts de l'essai Impacts, voire à une interaction entre la date de semis (pouvoir compétitif du blé) et la régulation. Le précédent a pu jouer un rôle non négligeable lui-aussi. Indirectement, c'est le précédent maïs grain qui a impacté le rendement du blé TBSSBTH en retardant son semis.

L'essai Impacts devait nous permettre d'identifier des différences entre couverts mais cela n'a pas été possible car le blé était très bien implanté et car les couverts sont morts en cours de saison. L'effet du précédent (jachère pendant plus de 10 ans) sur le sol nous a peut-

être empêchés d'observer un effet des couverts sur la structure du sol et la dynamique de l'eau.

Il y a peut-être eu une compensation entre les effets positifs et négatifs du couvert sur la culture : pour la luzerne par exemple, le couvert semble avoir apporté de l'azote au blé durant l'hiver, mais un autre facteur non identifié a gommé cet effet. La quantité négligeable d'azote apportée par le trèfle TBSSBTH et la compétition qu'il a exercée pour cette ressource sont un résultat relativement surprenant. Le trèfle était pourtant implanté depuis plus d'un an. Ceci confirme que la quantité d'azote apportée par les légumineuses est avant tout fonction de leur biomasse et de son turnover.

Les deux essais auront en tout cas permis d'apprendre beaucoup sur la conduite. La conception de systèmes de culture innovants donne lieu à une prise de risques et donc à des erreurs, mais celles-ci offrent parfois autant de réponses que les succès. Ici, les herbicides ont été sur-dosés ou mal choisis par rapport à la situation dans l'essai Impacts (couverts chétifs et clairsemés, blé compétitif). La régulation était justifiée par la crainte de voir un couvert tel que la luzerne gagner en hauteur et gêner la photosynthèse du blé en fin de cycle ainsi que la récolte. L'expérience gagnée permettra d'envisager plus sereinement les essais à venir.

La survie du trèfle blanc TBSSBTH est une réussite dans la mesure où elle permet de bénéficier d'un couvert très bien implanté dans la parcelle dès la récolte, ce qui constitue un gain de temps et d'argent.

Dans l'essai Impacts, le mode d'implantation des couverts (sur sol nu après labour) n'était pas idéal et s'est soldé par un problème de salissement. D'après l'expérience d'agriculteurs rencontrés et les observations réalisées dans des essais par Arvalis-Institut du Végétal, l'implantation de légumineuses pérennes est souvent réussie en semis simultané avec le colza ou en sur-semis au printemps dans une céréale moyennement couvrante. Le semis simultané avec une céréale de printemps est en test cette année chez des agriculteurs. Une piste à tester qui conviendrait aux contraintes d'une station expérimentale serait de semer la légumineuse pérenne avec un couvert de céréale comme plante de service pour éviter le salissement de la parcelle jusqu'à ce que la légumineuse soit bien implantée.

Les conclusions de ces essais vont permettre d'alimenter les préconisations qu'Arvalis-Institut du Végétal donne aux agriculteurs ou conseillers techniques qui souhaitent mettre en place un SCP.

CONCLUSION

Les couverts pérennes de légumineuses apportent des services aux systèmes dans lesquels ils sont intégrés : lutte contre l'érosion, contrôle des bioagresseurs, notamment des adventices, fourniture d'azote, structuration du sol, stimulation de la vie du sol et de la biodiversité en général. Ces effets sont efficaces si d'autres leviers sont utilisés en complément. La présence d'un couvert bien développé dès la récolte de la culture principale supprime le risque d'implantation difficile du couvert en été et le couvert peut éventuellement être valorisé à l'interculture. Il s'agit donc d'une innovation permettant de substituer une partie de la mécanisation et de certains intrants par le « travail » du couvert.

Cependant, dans un SCP, les interactions entre le couvert et la culture se traduisent le plus souvent par une perte de rendement de la culture. Le suivi de deux essais mis en place durant la campagne 2013-2014 à Boigneville sur blé tendre d'hiver a permis de confirmer que le couvert pouvait impacter la disponibilité des ressources (eau, azote, lumière) pour la culture et ainsi causer une perte de rendement. Dans un blé implanté tardivement et avec une faible densité de peuplement, un couvert de trèfle blanc peut exercer une sévère compétition pour l'azote et la lumière. En revanche, dans un blé bien implanté associé à des couverts bien régulés, l'équilibre s'inverse : ce sont les couverts qui risquent de disparaître et avec eux leurs effets bénéfiques.

La compétitivité de la culture est donc un facteur capital de la réussite de la technique. En complément, les opérations de régulation du couvert doivent être ajustées finement à l'équilibre observé au champ et leur déclenchement doit être raisonné par rapport aux périodes où la culture sera sensible à la compétition. Les connaissances progressent en ce qui concerne la régulation des couverts par l'application de doses non létales d'herbicides. Des modes de régulation complémentaires visant à réduire l'usage d'herbicides mériteraient d'être testés. Par exemple, on peut imaginer un système analogue au strip-till dans lequel le couvert serait détruit sur des bandes où seront semées deux lignes de céréales rapprochées, permettant ainsi un contrôle mécanique du couvert et une occupation complémentaire du sol par les deux espèces. Il est probable que les systèmes les plus performants seront ceux dans lesquels le couvert sera conservé dans les cultures où la complémentarité est la meilleure et détruit lorsque la compétition qu'il exerce devient supérieure aux bénéfices qu'il apporte, comme cela peut être le cas pour la plupart des cultures de printemps.

Enfin, la génétique des couverts, mais aussi celle des cultures est un point critique sur lequel il est nécessaire de progresser pour obtenir des associations plus complémentaires dans le temps et dans l'espace. L'implication de sélectionneurs dans la conception de variétés de couverts moins compétitifs que les types actuellement utilisés sera déterminante pour l'amélioration de la stabilité des résultats des SCP.

La technique comporte encore de nombreux points à éclaircir mais l'accumulation de références permettra la diffusion de ce système à un plus grand nombre d'agriculteurs lorsqu'il sera suffisamment maîtrisé.

Liste des références bibliographiques

- Altieri, M. A. (1999). The ecological role of biodiversity in agroecosystems. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 74, 19–31.
- Archambeaud, M. (2004). Limaces - trouver l'équilibre. *Techniques Culturelles Simplifiées* 30, 28–29.
- Arvalis-infos. (2013, janvier 3). Irrigation - Une sécheresse à partir de fin montaison pénalise fortement le potentiel de rendement d'une céréale à paille. *Arvalis-Infos*. Consulté 8 juin 2014, à l'adresse <http://www.arvalis-infos.fr/view.jspz?obj=arvarticle&id=12519>
- Ayub, M., M. K. Ijaz, M. Tariq, M. Tahir, et M. A. Nadeem. (2012). Allelopathic Effects of Winter Legumes on Germination and Seedling Indicators of Various Summer Cereals. *Agricultura tropica et subtropica* 45.
- Bergkvist, G. (2003a). Effect of White Clover and Nitrogen Availability on the Grain Yield of Winter Wheat in a Three-Season Intercropping System. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B - Soil & Plant Science* 53, 97–109.
- Bergkvist, G. (01/2003b). Influence of White Clover Traits on Biomass and Yield in Winter Wheat- or Winter Oilseed Rape-Clover Intercrops. *Biological Agriculture & Horticulture* 21, 151–164.
- Bieri, M., F. Burkhalter, A. Chervet, et W. Jossi. (2010). limace-ufa.pdf. *Revue UFA* 3, 47–53.
- 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.
- Cardina, J. et N. L. Hartwig. (1988). Atrazine, bifenox, and shade effects on crownvetch (*Coronilla varia*) nodulation and nodule activity. *Weed Science* 535–539.
- 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*. INAPG (AgroParisTech).
- Carof, M., S. De Tourdonnet, Y. Coquet, V. Hallaire, et J. Roger-Estrade. (2007c). Hydraulic conductivity and porosity under conventional and no-tillage and the effect of three species of cover crop in northern France. *Soil Use and Management* 23, 230–237.
- 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.
- Casper, B. B. et R. B. Jackson. (1997). Plant competition underground. *Annual Review of Ecology and Systematics* 28, 545–570.
- Corak, S. J., D. G. Blevins, et S. G. Pallardy. (1987). Water Transfer in an Alfalfa/Maize Association. *Plant Physiology* 84, 582–586.
- Corre-Hellou, G., N. Brisson, M. Launay, J. Fustec, et Y. Crozat. (2007a). Effect of root depth penetration on soil nitrogen competitive interactions and dry matter production in pea–barley intercrops given different soil nitrogen supplies. *Field Crops Research* 103, 76–85.

- Corre-Hellou, G., N. Brisson, M. Launay, J. Fustec, et Y. Crozat. (2007b). Effect of root depth penetration on soil nitrogen competitive interactions and dry matter production in pea–barley intercrops given different soil nitrogen supplies. *Field Crops Research* 103, 76-85.
- Corre-Hellou, G., J. Fustec, et Y. Crozat. (2006). Interspecific Competition for Soil N and its Interaction with N₂ Fixation, Leaf Expansion and Crop Growth in Pea–Barley Intercrops. *Plant and Soil* 282, 195-208.
- Cuttle, S., M. Shepherd, et G. Goodlass. (2003). A review of leguminous fertility-building crops, with particular reference to nitrogen fixation and utilisation. *Institute of Grassland & Environmental Research: Aberystwyth*.
- Danso, S. K. A., S. Curbelo, C. Labandera, et D. Pastorini. (1991). Herbage yield and nitrogen-fixation in a triple-species mixed sward of white clover, lotus and fescue. *Soil Biology and Biochemistry* 23, 65-70.
- De Tourdonnet, S. (2008, janvier). Résultats d'un essai conduit à l'unité INRA d'Agronomie Paris-Grignon - Utilisation de cultures associées en semis direct. *Techniques Culturelles Simplifiées* 46, 21-23.
- Deguchi, S., Y. Shimazaki, S. Uozumi, K. Tawaraya, H. Kawamoto, et O. Tanaka. (2007). White clover living mulch increases the yield of silage corn via arbuscular mycorrhizal fungus colonization. *Plant and Soil* 291, 291-299.
- Deguchi, S., S. Uozumi, K. Tawaraya, H. Kawamoto, et O. Tanaka. (2005). Living Mulch with White Clover Improves Phosphorus Nutrition of Maize of Early Growth Stage. *Soil Science and Plant Nutrition* 51, 573-576.
- Den Hollander, N. G., L. Bastiaans, et M. J. Kropff. (2007). Clover as a cover crop for weed suppression in an intercropping design. *European Journal of Agronomy* 26, 104-112.
- Derpsch, R. et T. Friedrich. (2009). Development and current status of no-till adoption in the world. In *Proceedings on CD, 18th Triennial Conference of the International Soil Tillage Research Organisation (ISTRO)*.
- Evans, P. S. (1978). Plant root distribution and water use patterns of some pasture and crop species. *New Zealand Journal of Agricultural Research* 21, 261-265.
- Frey, B. et H. Schüepp. (1992). Transfer of symbiotically fixed nitrogen from berseem (*Trifolium alexandrinum* L.) to maize via vesicular—arbuscular mycorrhizal hyphae. *New Phytologist* 122, 447-454.
- Fustec, J., F. Lesuffleur, S. Mahieu, et J.-B. Cliquet. (2010). Nitrogen rhizodeposition of legumes. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 30, 57-66.
- Gate, P. et M. Giban. (2003). Stades du Blé. Arvalis-Institut du Végétal.
- Ghiloufi, M., P. Saulas, D. Picard, et S. de Tourdonnet. (2010). Y a-t-il un intérêt agronomique à associer une culture commerciale et une plante de couverture ? Cas d'une association blé (*Triticum aestivum* L.) fétuque rouge (*Festuca rubra* L.). *Cahiers de l'agriculture* 19, 420-431.
- Gibson, L., J. Singer, S. Barnhart, et B. Blaser. (2006). Intercropping Winter Cereal Grains and Red Clover. Iowa State University - University Extension.

- Gravesen, E. (2008). Linyphiid spider populations in sustainable wheat-clover bi-cropping compared to conventional wheat-growing practice. *Journal of Applied Entomology* 132, 545-556.
- Hall, J. K., N. L. Hartwig, et L. D. Hoffman. (1984). Cyanazine Losses in Runoff from No-Tillage Corn in «Living» and Dead Mulches vs. Unmulched, Conventional Tillage. *Journal of Environmental Quality* 13, 105-110.
- Hartwig, N. L. et H. U. Ammon. (2002). Cover crops and living mulches. *Weed science* 50, 688-699.
- Hauggaard-Nielsen, H., P. Ambus, et E. S. Jensen. (2001). Temporal and spatial distribution of roots and competition for nitrogen in pea-barley intercrops—a field study employing 32P technique. *Plant and Soil* 236, 63-74.
- Hauggaard-Nielsen, H. et E. S. Jensen. (2005). Facilitative Root Interactions in Intercrops. *Plant and Soil* 274, 237-250.
- Herridge, D. F., M. B. Peoples, et R. M. Boddey. (2008). Global inputs of biological nitrogen fixation in agricultural systems. *Plant and Soil* 311, 1-18.
- Hiltbrunner, J., P. Jeanneret, M. Liedgens, P. Stamp, et B. Streit. (04/2007a). Response of Weed Communities to Legume Living Mulches in Winter Wheat. *Journal of Agronomy and Crop Science* 193, 93-102.
- Hiltbrunner, J., M. Liedgens, L. Bloch, P. Stamp, et B. Streit. (1/2007b). Legume cover crops as living mulches for winter wheat: Components of biomass and the control of weeds. *European Journal of Agronomy* 26, 21-29.
- Hiltbrunner, J., B. Streit, et M. Liedgens. (6/2007c). Are seeding densities an opportunity to increase grain yield of winter wheat in a living mulch of white clover? *Field Crops Research* 102, 163-171.
- Hinsinger, P. (2012). Les cultures associées céréales/légumineuses en agriculture « bas intrants » dans le Sud de la France. PerfCom – ANR.
- Hodge, A., D. Robinson, et A. Fitter. (2000). Are microorganisms more effective than plants at competing for nitrogen? *Trends in Plant Science* 5, 304-308.
- Høgh-Jensen, H. et J. K. Schjoerring. (2000). Below-ground nitrogen transfer between different grassland species: direct quantification by 15N leaf feeding compared with indirect dilution of soil 15N. *Plant and Soil* 227, 171-183.
- Høgh-Jensen, H. et J. K. Schjoerring. (2001). Rhizodeposition of nitrogen by red clover, white clover and ryegrass leys. *Soil Biology and Biochemistry* 33, 439-448.
- Hollander, N. G. den. (2012). *Growth Characteristics of Several Clover Species and Their Suitability for Weed Suppression in a Mixed Cropping Design*. Wageningen University.
- Humphries, A. W., R. A. Latta, G. C. Auricht, et W. D. Belloti. (2004). Over-cropping lucerne with wheat: effect of lucerne winter activity on total plant production and water use of the mixture, and wheat yield and quality. *Australian Journal of Agricultural Research* 55, 839-848.
- Johansen, A. et E. S. Jensen. (1996). Transfer of N and P from intact or decomposing roots of pea to barley interconnected by an arbuscular mycorrhizal fungus. *Soil Biology and Biochemistry* 28, 73-81.

- Jokela, W. E., J. H. Grabber, D. L. Karlen, T. C. Balser, et D. E. Palmquist. (2009). Cover Crop and Liquid Manure Effects on Soil Quality Indicators in a Corn Silage System. *Agronomy Journal* 101, 727.
- Jones, L. et R. O. Clements. (2008). Development of a low input system for growing wheat (*Triticum vulgare*) in a permanent understorey of white clover (*Trifolium repens*). *Annals of Applied Biology* 123, 109-119.
- Jorgensen, F. V. et S. F. Ledgard. (1997). Contribution from stolons and roots to estimates of the total amount of N-2 fixed by white clover. *Annals of Botany* 80, 641-648.
- Justes, E., N. Beaudoin, P. Bertuzzi, R. Charles, J. Constantin, C. Dürr, et al. (2012). Réduire les fuites de nitrate au moyen de cultures intermédiaires. *Conséquences sur les bilans d'eau et d'azote, autres services écosystémiques. Rapport d'étude, INRA (France)*.
- Kaspar, T. C., Kladvko, J. W. Singer, S. Morse, et D. Mutch. (s. d.). Potentials and limitations of cover crops, living mulches and perennials to reduce nutrient losses to water sources from agricultural fields. Mississippi River Gulf of Mexico Watershed Nutrient Task Force.
- Kremen, C., A. Iles, et C. Bacon. (2012). Diversified farming systems: an agroecological, systems-based alternative to modern industrial agriculture. *Ecology and Society* 17, 44.
- Kumar, K. et K. M. Goh. (2002). Management practices of antecedent leguminous and non-leguminous crop residues in relation to winter wheat yields, nitrogen uptake, soil nitrogen mineralization and simple nitrogen balance. *European Journal of Agronomy* 16, 295-308.
- Labreuche, J. (2011b). *Cultures Intermédiaires - Impacts et Conduite*, Arvalis-Institut du Végétal.
- Labreuche, J. (2011a). Introduction - Des couverts aux multiples facettes. In *Cultures Intermédiaires - Impacts et Conduite*. Arvalis-Institut du Végétal.
- Labreuche, J., C. Le Souder, P. Castillon, J. F. Ouvry, B. Real, J. C. Germon, et S. De Tourdonnet. (2007). Evaluation des impacts environnementaux des Techniques Culturelles Sans labour (TCSL) en France. ADEME-ARVALIS Institut du végétal-INRA-APCA-AREAS-ITB-CETIOM-IFVV.
- Labreuche, J., J. Roger-Estrade, I. Feix, T. Viloingt, D. Caboulet, J. P. Daouze, et al. (2008, février). Les Techniques sans labour concernent un tiers des surfaces françaises. *Perspectives Agricoles* 38-43.
- Lahmar, R. (2010). Adoption of conservation agriculture in Europe. *Land Use Policy* 27, 4-10.
- Lambers, H., F. S. Chaplin III, et T. Pons. (2008). *Plant physiological Ecology*, 2nd ed. New York: Springer.
- Liedgens, M., E. Frossard, et W. Richner. (2004). Interactions of maize and Italian ryegrass in a living mulch system:(2) Nitrogen and water dynamics. *Plant and soil* 259, 243-258.
- Lithourgidis, A. S., C. A. Dordas, C. A. Damalas, et D. N. Vlachostergios. (2011). Annual intercrops: an alternative pathway for sustainable agriculture. *Australian Journal of Crop Science* 5.
- Malézieux, E., Y. Crozat, C. Dupraz, M. Laurans, D. Makowski, H. Ozier-Lafontaine, et al. (2009). Mixing plant species in cropping systems: concepts, tools and models. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 29, 43-62.

- Martin, R. C., P. R. Greyson, et R. Gordon. (1999). Competition between corn and a living mulch. *Canadian journal of plant science* 79, 579–586.
- Mauriès, M. (2003). *Luzerne - Culture, récolte, conservation, utilisation*, 2ème édition. La France Agricole.
- Mead, R. et R. W. Willey. (1980). The Concept of a ‘Land Equivalent Ratio’ and Advantages in Yields from Intercropping. *Experimental Agriculture* 16, 217–228.
- Nakamoto, T. et M. Tsukamoto. (2006). Abundance and activity of soil organisms in fields of maize grown with a white clover living mulch. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 115, 34–42.
- Naudin, C., G. Corre-Hellou, S. Pineau, Y. Crozat, et M.-H. Jeuffroy. (2010). The effect of various dynamics of N availability on winter pea–wheat intercrops: Crop growth, N partitioning and symbiotic N₂ fixation. *Field Crops Research* 119, 2–11.
- Ochsner, T. E., K. A. Albrecht, T. W. Schumacher, J. M. Baker, et R. J. Berkevich. (2010). Water Balance and Nitrate Leaching under Corn in Kura Clover Living Mulch. *Agronomy Journal* 102, 1169.
- Ozier-Lafontaine, H., F. Lafolie, L. Bruckler, R. Tournebize, et A. Mollier. (1998). Modelling competition for water in intercrops: theory and comparison with field experiments. *Plant and soil* 204, 183–201.
- Poyac, C., G. Piva, et S. Cordeau. (2013). Quinoa et trèfle-INRA-Columa 13.pdf. Présenté à AFPP – 22e Conférence du COLUMA journées internationales de la sur la lutte contre les mauvaises herbes, Dijon.
- Quijas, S., B. Schmid, et P. Balvanera. (2010). Plant diversity enhances provision of ecosystem services: A new synthesis. *Basic and Applied Ecology* 11, 582–593.
- Rasse, D. P., A. J. Smucker, et D. Santos. (2000). Alfalfa root and shoot mulching effects on soil hydraulic properties and aggregation. *Soil Science Society of America Journal* 64, 725–731.
- revue TCS. (2007). Une plante anti-rongeurs ? *Techniques Culturelles Simplifiées* 45, 30.
- Robert, S. (2013). *Caractérisation des exploitations d’un réseau d’agriculteurs en semis direct* (mémoire de fin d’études). Arvalis - Institut du végétal.
- Ross, S. M., J. R. King, R. C. Izaurralde, et J. T. O’Donovan. (2001). Weed suppression by seven clover species. *Agronomy Journal* 93, 820–827.
- Rychembusch, V. (2014). Le trèfle blanc assure plusieurs intercultures. *Réussir Lait* 281, 44–45.
- Sawyer, J. E., P. Pedersen, D. W. Barker, D. A. Ruiz Diaz, et K. Albrecht. (2010). Intercropping Corn and Kura Clover: Response to Nitrogen Fertilization. *Agronomy Journal* 102, 568.
- Schmidt, N. P., M. E. O’Neal, et J. W. Singer. (2007). Alfalfa Living Mulch Advances Biological Control of Soybean Aphid. *Environmental Entomology* 36, 416–424.
- Schmidt, O., J. P. Curry, R. A. Hackett, G. Purvis, et R. O. Clements. (2001). Earthworm communities in conventional wheat monocropping and low-input wheat-clover intercropping systems. *Annals of Applied Biology* 138, 377–388.

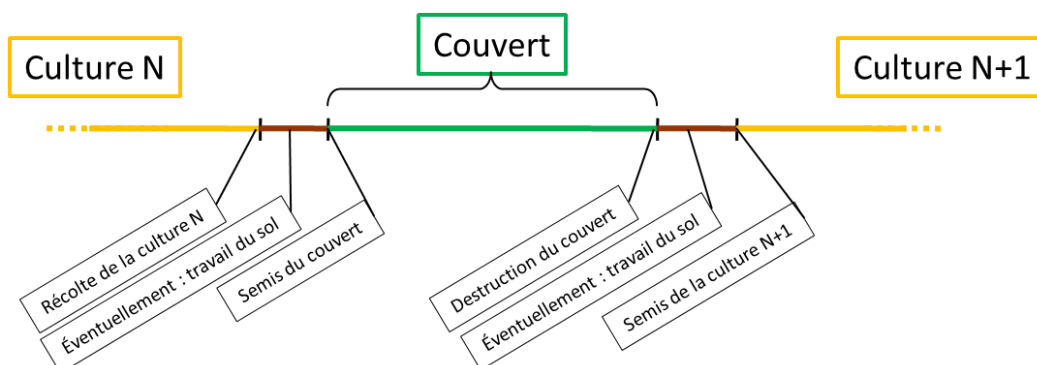
- Scopel, E., B. Triomphe, F. Affholder, F. A. M. Silva, M. Corbeels, J. H. V. Xavier, et al. (2013). Conservation agriculture cropping systems in temperate and tropical conditions, performances and impacts. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 33, 113–130.
- Seavers, G. P. et K. J. Wright. (1999). Crop canopy development and structure influence weed suppression. *Weed Research* 39, 319–328.
- Seysen-Fouan, S. (2012). Optidose M Charpentier.pdf. *Optidose* 8–12.
- 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. AgroParisTech.
- Site web Arvalis - Institut du Végétal. (s. d.). Arvalis-Institut du Végétal : Valeurs et missions. *Arvalis-Institut du Végétal*. Consulté 8 avril 2014, à l’adresse <http://www.arvalisinstitutduvegetal.fr/missions-@/view-697-arvstatiques.html>
- Soane, B. D., B. C. Ball, J. Arvidsson, G. Basch, F. Moreno, et J. Roger-Estrade. (2012). No-till in northern, western and south-western Europe: A review of problems and opportunities for crop production and the environment. *Soil and Tillage Research* 118, 66–87.
- Stern, W. R. (1993). Nitrogen fixation and transfer in intercrop systems. *Field crops research* 34, 335–356.
- Teasdale, J. R. (2003). Principles and practices of using cover crops in weed management systems. In *Weed management for developing countries (Addendum 1)*. R. Labrada.
- Teasdale, J. R. (2013). Contribution of Cover Crops to Weed Management in Sustainable Agricultural Systems. *Journal of Production Agriculture* 9, 475–479.
- Teasdale, J. R. et C. S. Daughtry. (1993). Weed suppression by live and desiccated hairy vetch (*Vicia villosa*). *Weed Science* 207–212.
- Thorsted, M. D., J. E. Olesen, et N. Koefoed. (2002). Effects of white clover cultivars on biomass and yield in oat/clover intercrops. *The Journal of Agricultural Science* 138, 261–267.
- Thorsted, M. D., J. E. Olesen, et J. Weiner. (2006a). Mechanical control of clover improves nitrogen supply and growth of wheat in winter wheat/white clover intercropping. *European Journal of Agronomy* 24, 149–155.
- Thorsted, M. D., J. E. Olesen, et J. Weiner. (2006b). Width of clover strips and wheat rows influence grain yield in winter wheat/white clover intercropping. *Field Crops Research* 95, 280–290.
- Thorsted, M. D., J. Wiener, et J. E. Olesen. (2006c). Above- and below-ground competition between intercropped winter wheat *Triticum aestivum* and white clover *Trifolium repens*. *Journal of Applied Ecology* 43, 237–245.
- Tilman, D., K. G. Cassman, P. A. Matson, R. Naylor, et S. Polasky. (2002). Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature* 418, 671–677.
- Van Der Ploeg, J. D. (2010). The food crisis, industrialized farming and the imperial regime. *Journal of Agrarian Change* 10, 98–106.
- Van Sambeek, J. W., N. E. Navarrete-Tindall, H. E. Garrett, C.-H. Lin, R. L. McGraw, D. C. Wallace, et others. (2007). Ranking the shade tolerance of forty-five candidate groundcovers for agroforestry plantings.

- Vandermeer, J. (1989). *The Ecology of Intercropping*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Vandermeer, J. (1995). The Ecological Basis Of alternative agriculture. *Annual Review of Ecology and Systematics* 26, 201-224.
- Véricel, G. (2010). Systèmes de culture associés à l'utilisation de couverts végétaux permanents. Chambre d'agriculture Poitou-Charentes.
- Viloingt, T., D. Couture, et B. Beets. (2006). La conduite de l'interculture a un impact sur les conditions de semis. *Perspectives Agricoles* 320, 38 - 43.
- Voisin, A.-S., J. Guéguen, C. Huyghe, M.-H. Jeuffroy, M.-B. Magrini, J. M. Meynard, et al. (2013). Les légumineuses dans l'Europe du XXI^e siècle: Quelle place dans les systèmes agricoles et alimentaires actuels et futurs? Quels nouveaux défis pour la recherche? <http://www6.inra.fr/ciag/Revue>.
- Waligora, C. (2012). Campagnols: la prédation esst votre meilleure arme, efficace et durable. *Techniques Culturelles Simplifiées* 66.
- Waligora, C. (2014). Couverture Végétale Permanente - Témoignages et expérimentations. *Techniques Culturelles Simplifiées* 76, 24 - 29.
- Waligora, C. et F. Thomas. (2014). Couverture Végétale Permanente - Apprendre à piloter la compétition. *Techniques Culturelles Simplifiées* 76, 18 - 23.
- Wall, G. J., E. A. Pringle, et R. W. Sheard. (1990). Intercropping red clover with silage corn for soil erosion control. *Canadian Journal of Soil Science* 71.
- Wezel, A., S. Bellon, T. Doré, C. Francis, D. Vallod, et C. David. (2009). Agroecology as a science, a movement and a practice. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 29, 503-515.
- White, J. G. et T. W. Scott. (1991). Effects of perennial forage-legume living mulches on no-till winter wheat and rye. *Field Crops Research* 28, 135-148.
- Wiggans, D. R., J. W. Singer, K. J. Moore, et K. R. Lamkey. (2012). Response of Continuous Maize with Stover Removal to Living Mulches. *Agronomy Journal* 104, 917.
- Zemenchik, R. A., K. A. Albrecht, C. M. Boerboom, et J. G. Lauer. (2000). Corn production with kura clover as a living mulch. *Agronomy Journal* 92, 698-705.
- Ziyomo, C., K. A. Albrecht, J. M. Baker, et R. Bernardo. (2013). Corn Performance under Managed Drought Stress and in a Kura Clover Living Mulch Intercropping System. *Agronomy Journal* 105, 579.

Annexe 1 : Modes de gestion des couverts et d'intégration des légumineuses dans les rotations

i. Couverts d'interculture « classiques »

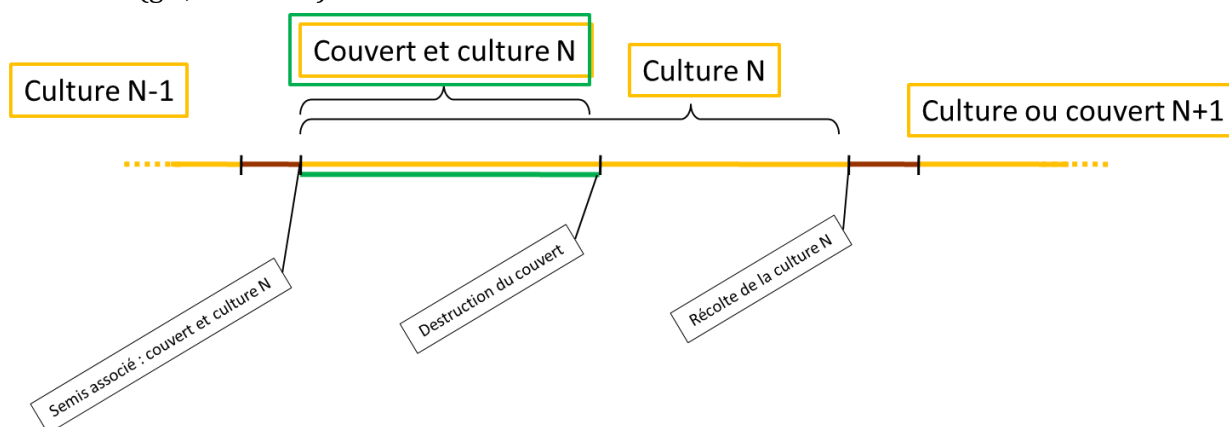
Le couvert est semé après la récolte d'une culture et éventuellement un travail du sol, il est détruit avant l'implantation de la culture suivante.



- **Avantages :** Gestion relativement simple, captage des nitrates, production de matière organique
 - **Inconvénients :** coût de la semence, temps de travail, implantation parfois difficile notamment en cas de sécheresse estivale, biomasse limitée en interculture courte
 - **Exemple :** mélange avoine-vesce semé fin août et détruit par le gel et un travail du sol avant une culture de printemps
 - **Remarque :** Toutes les variantes existent : en système de semis direct sous couvert, bien souvent, la culture N+1 est semée au moment de la destruction du couvert ou très peu de temps après.
- (référence : Labreuche, 2011b)

ii. Couverts associés en début de culture

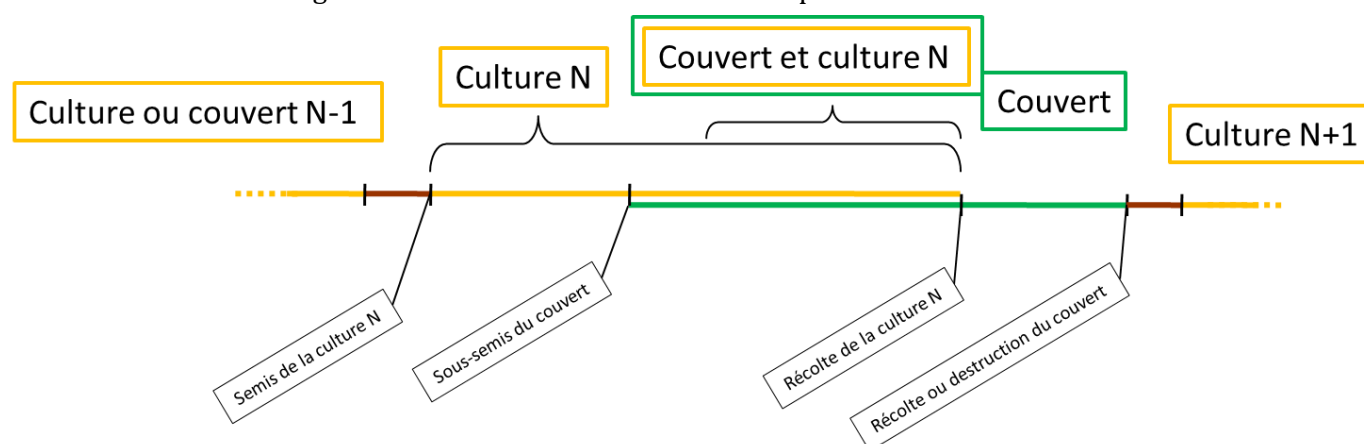
Le couvert est implanté à l'automne en même temps que la culture, il est détruit en cours de culture (gel, herbicide).



- **Avantages** : compétition sur les adventices, perturbation des ravageurs, apport d'azote à la culture, apport de matière organique. Gain de 0 à 3 q/ha en colza.
- **Inconvénients** : implantation critique, vigilance lors du désherbage (sélectivité du couvert), parfois non destruction du couvert par le gel, compétition du couvert sur la culture possible en cas de destruction tardive ou partielle du couvert
- **Exemple-type** : système colza + Gesse-Fenugrec-Lentille développé par le CETIOM

iii. Couverts associés en fin de culture (type culture fourragère en relai)

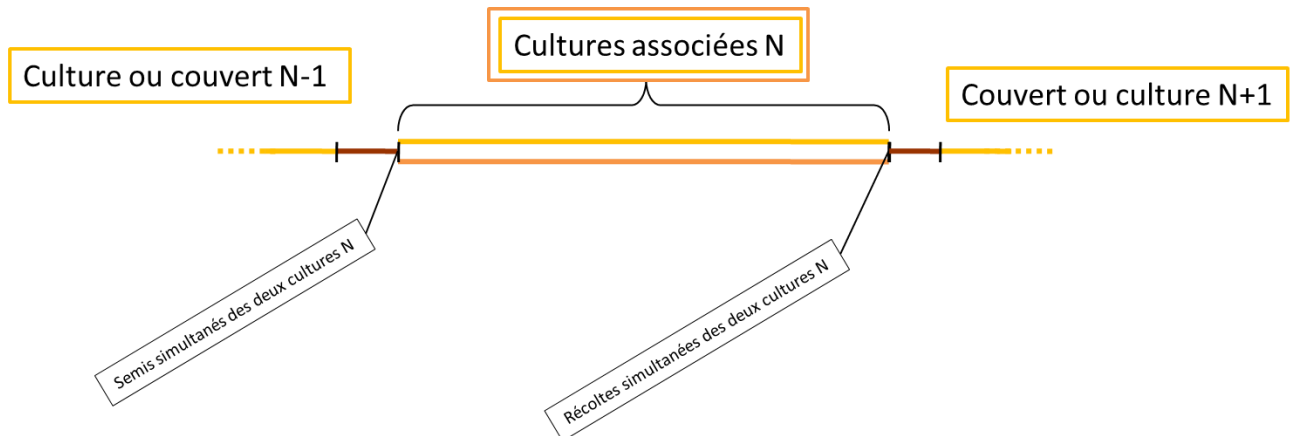
La culture fourragère est sous-semée dans la culture en place.



- **Avantages** : implantation plus précoce et sécurisée du couvert ou de la culture fourragère par rapport à un semis après la récolte de la culture (peu de risque de déficience de la levée liée à la sécheresse), présence d'un couvert bien développé dès la récolte de la culture principale, si la culture fourragère est annuelle, production de fourrage sans limitation des cultures de vente.
- **Inconvénients** : levée du couvert parfois difficile, pas de possibilité de contrôle mécanique des adventices après la récolte, compétition du couvert sur la fin du cycle de la culture possible en cas d'implantation précoce du couvert, risque d'effet phytotoxique sur le couvert des herbicides appliqués dans la culture, risque d'étiollement du couvert en cas d'implantation tardive dans une culture très compétitive pour la lumière
- **Exemple** : Sous-semis de trèfle à la volée dans une céréale au printemps

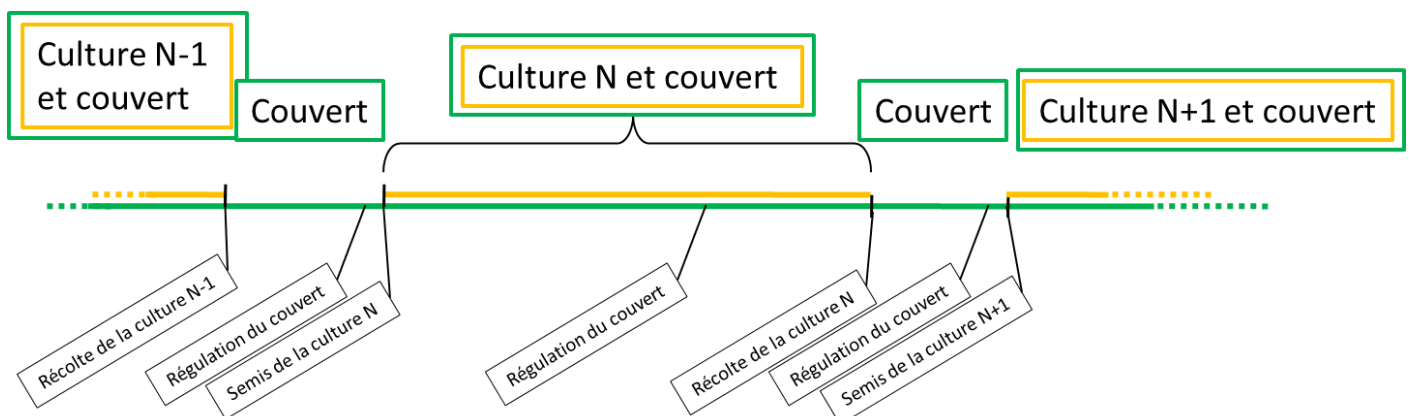
iv. Association de cultures de vente annuelles

Les cultures sont semées en même temps et récoltées en même temps (densité de chaque espèce réduite par rapport à une culture pure).



- **Avantages** : production sécurisée, gain de rendement par rapport aux deux cultures en pur ($LER > 1$), facilitation par la céréale pour la légumineuse (contrôle des adventices), facilitation par la légumineuse pour la céréale (diminution des besoins en azote), meilleur contrôle de certains bioagresseurs
- **Inconvénients** : tri obligatoire à la récolte dans la plupart des cas, choix des espèces et variétés complexe, désherbage difficile, proportions à la récolte dépendantes des conditions
- **Exemples** : Association céréale - légumineuse à graine ; méteil fourrager (référence : Hinsinger, 2012)

v. Couverts pérennes SCP



- **Avantages** : Maximise les bénéfices des couverts de légumineuses (lutte contre l'érosion, contrôle des bioagresseurs, notamment des adventices, fourniture d'azote, structuration du sol, stimulation de la vie du sol et de la biodiversité en général), présence d'un couvert bien développé dès la récolte de la culture principale, supprime le risque d'implantation difficile du couvert en été, valorisation éventuelle du couvert à l'interculture
- **Inconvénients** : maîtrise difficile de la compétition, manque de variétés de couverts optimisées pour le système, compatibilité du couvert avec la diversité des cultures de la rotation
- **Exemple** : rotation maïs-soja avec couvert pérenne de trèfle du Caucase aux USA

Annexe 2 : Synthèse des essais analysés en bibliographie pour le rendement des céréales d'hiver

rendement des céréales	culture	ordre de grandeur (en % du témoin)	couvert	gestion du couvert	facteur identifié	source	référence
réduction	blé tendre	7 à 120 %	luzerne, lotier, trèfle blanc géant, coronille bigarrée, trèfle blanc, trèfle violet	aucune régulation	compétition encore plus forte la deuxième année du couvert, parfois un effet fourniture d'azote	White and Scott, 1991	
	orge	9 à 100 %	luzerne, lotier, trèfle blanc géant, coronille bigarrée, trèfle blanc, trèfle violet	aucune régulation	compétition encore plus forte la deuxième année du couvert, parfois un effet fourniture d'azote	White and Scott, 1991	
	blé tendre	90%	fétuque rouge	aucune régulation		Picard <i>et al.</i> 2010	
	blé tendre	46 à 88 %	trèfle blanc	aucune régulation	forte compétition	Hiltbrunner <i>et al.</i> , 2007	
	blé tendre	55 à 70%	trèfle blanc	herbicide deux semaines avant la montaison	compétition pour la lumière, implantation réduite	Bergkvist, 2003a	
	blé tendre	75 à 93 %	trèfle violet		trèfle violet implanté en même temps que le blé	Pridham, 2008	
	blé tendre	50%	luzerne	herbicide deux semaines avant la montaison	compétition précoce pour la lumière qui a réduit le tallage	Shili-Touzi <i>et al.</i> , 2009	7
	blé tendre	20 à 85%	luzerne, minette, lotier, trèfle blanc, fétuque rouge, fétuque ovine	couverts implantés en août puis trois cultures de blé tendre d'hiver, régulation du couvert par des doses non létales d'herbicides surtout à partir de la deuxième année	lumière, parfois azote	Carof (2006), Carof <i>et al.</i> (2007 a, b, c) ; De Tourdonnet (2008)	8
	blé tendre	75 à 90 %	trèfle blanc		compétition pour lumière et l'azote pendant la phase végétative, et l'eau pendant le remplissage	Thorsted <i>et al.</i> 2006b	9

rendement des céréales	culture	ordre de grandeur (en % du témoin)	couvert	gestion du couvert	facteur identifié	source	référence
pas de réduction	blé tendre	100 à 115 % (NS)	luzerne	aucune régulation, couvert semé à l'implantation du blé		Blackshaw <i>et al.</i> 2010	
	blé tendre	100 % ou plus	luzerne	rototillé au semis du blé	fourniture d'azote, blé de variétés populations très hautes	Philippe Guichard, dans Bio.pl@ine n° 20 – Chambres d'Agriculture d'Ile de France	
	blé tendre	100 à 110 % ;	trèfle blanc	bineuse à broches à plusieurs dates	fourniture d'azote	Thorsted <i>et al.</i> , 2006a	4
	blé tendre	équivalent	trèfle blanc		aucune fertilisation azotée	Jones, 2006	
	blé tendre	équivalent	trèfle blanc (nain et tardif)	aucune régulation		Bergkvist, 2003b	
Augmentation	blé tendre	rendement : 116 % à 100 UN ; protéines : 110 %	luzerne	deuxième année de la luzerne, herbicides à doses non létales plusieurs fois dans la saison	fourniture d'azote, semis direct depuis une dizaine d'années comparé à un labour	Labreuche, comm. Pers. (chez H. Charpentier)	1
	blé tendre	rendement : 106 % ; protéines : 110 %	trèfle blanc	deuxième année du trèfle, herbicides à doses non létales plusieurs fois dans la saison, trèfle tué en mars	fourniture d'azote	Labreuche, comm. Pers. (essai 2012- 2013 à Boigneville)	2
	blé tendre	rendement : jusque 135 % ; avec concentration en azote 115 % et rendement en azote 150 %	trèfle blanc	déchaumage dans le trèfle avant le semis du blé, herbicide deux semaines avant la montaison	fourniture d'azote probablement liée au déchaumage (trèfle dans sa 3ème année)	Bergkvist, 2003a	3
	blé tendre	116%	trèfle blanc (nain et tardif)	cultivateur avant le semis du blé, deuxième année du trèfle	fourniture d'azote	Bergkvist, 2003b	
	blé tendre	112%	trèfle blanc nain	couvert implanté dans le colza précédent, roulage et glyphosate avant le semis du blé		David Mennegaux, dans Waligora, 2014 (TCS n°76)	

Annexe 3 : Détail de quelques références utilisées pour les impacts du couvert

culture	couvert	effet	explications	référence	numéro de la référence
	luzerne	la luzerne n'engendre pas de compétition pour les nutriments à la surface	elle est implantée en profondeur	Evans, 1978	5
maïs	trèfle du Caucase	couvert bien régulé (tué chimiquement sur la bande de semis), le maïs a pu produire 13 à 15 TMS/ha et 70 à 110 q/ha de grain. Le contenu en eau du sol n'a pas été affecté par la présence du couvert.	le trèfle du Caucase a été fortement ralenti par le manque d'eau et que le maïs a eu accès à l'eau en profondeur pendant les périodes sèches.	Zemenchik <i>et al.</i> , 2000	6
blé	luzerne, lotier	amélioration de la stabilité dans le temps de la conductivité hydraulique et de la porosité, surtout dans les horizons supérieurs. En mai, la macroporosité est passée de 4% à 5% en surface et sur l'horizon 10-20 cm respectivement sur SD sans plante de couverture à 9% et 8% en SCP	En région parisienne sur un sol en semis direct depuis 3 ans, couverts implantés en août puis trois cultures de blé tendre d'hiver, régulation du couvert par des doses non létales d'herbicides surtout à partir de la deuxième année	Carof (2006 ; 2007) ; De Tourdonnet (2008)	8
maïs	Trèfle du Caucase	lixiviation réduite de 31 et 74 % avec 90 et 0 unités d'N/ha/an ; réduction de 37 à 50 mm du contenu en eau du sol au printemps et augmentation de 29 à 36 mm en été. Evapotranspiration totale identique entre traitements à chaque période de l'année sauf en mai : supérieure de 11 à 41 % avec le couvert, surtout une année à mois de mai sec	comparaison entre un maïs dans un trèfle du Caucase conservé et régulé et un trèfle du Caucase détruit : fourniture d'azote par la destruction ; concentration en nitrates plus faibles sous le couvert au moment du drainage ; effet du prélèvement d'eau ou de la réduction de l'évaporation selon la période	Ochsner <i>et al.</i> 2010	10
maïs	trèfle du Caucase	réduction des besoins en azote du maïs associé au trèfle dans un des 6 sites	Fourniture d'azote dans un des sites (un sol à faible réserve en phosphore, pH bas et faible taux de matières organiques), mauvaise implantation du maïs et compétition dans d'autres sites	Sawyer <i>et al.</i> , 2010	11

culture	couvert	effet	explications	référence	numéro de la référence
blé	lotier corniculé	réduit de moitié la diversité des adventices	compétition pour la lumière et l'espace	Hiltbrunner <i>et al.</i> , 2007	12
	trèfle blanc	réduit de moitié la diversité des adventices et d'un facteur 10 la densité d'adventices	compétition pour la lumière et l'espace		
	trèfle souterrain	moins efficace que le lotier et le trèfle blanc contre les adventices	couverture moins rapide que le trèfle blanc au printemps		
	luzerne annuelle (M. truncatula)	moins efficace que les couverts pérennes contre les adventices	couvert mort pendant l'été		
maïs	trèfle violet	réduction de 46 à 78 % des pertes de sol (érosion)	comparaison entre un maïs seul implanté après labour et un maïs avec trèfle violet, également après labour	Wall <i>et al.</i> , 1990	13
maïs	coronille bigarrée ou lotier corniculé	réduction de 95 à 100 % du ruissellement, des pertes de sol et d'un pesticide	maïs semé dans un couvert déjà implanté, avec une pente de 14 %	Hall <i>et al.</i> 1984	14
avoine	trèfle blanc (différentes variétés)	pas de réduction, voire une augmentation de la densité des adventices	couverture lente et incomplète	thorsted <i>et al.</i> 2002	15
quinoa	trèfle blanc	pas de réduction de l'ambrosie par le trèfle	développement du trèfle trop lent, semis simultané en conditions contrôlées. Serait différent si le trèfle était déjà implanté	Poyac <i>et al.</i> 2013	16
maïs	Trèfle du Caucase	Quantité et stabilité des macro-aggrégats favorisée jusqu'à 30 cm de profondeur. Pas d'augmentation de la quantité de matière organique du sol, mais augmentation de la fraction labile du carbone	implantation du maïs dans le trèfle une année sur deux. Manque de réponse de la quantité de matière organique au couvert permanent attribué aux 20 années de conduite sans travail du sol, rotation incluant de la luzerne et des apports de fumier.	Jokela <i>et al.</i> , 2009	17

Annexe 4 : bibliographie sur l'impact sur le sol, la biodiversité et les bioagresseurs

Le couvert peut modifier des composantes du système sans passer par l'interaction directe avec la culture. Certains processus affectés par le couvert peuvent ne voir leur fonctionnement significativement modifié qu'après plusieurs années de pratique. C'est notamment le cas pour les propriétés du sol. Le couvert aura donc parfois en plus de ses impacts sur la culture en place des effets sur les cultures des saisons suivantes.

Quijas *et al.* (2010) ont fait apparaître dans une méta-analyse que la diversité végétale affecte de manière bénéfique les services écosystémiques que sont la fourniture de produits végétaux, la lutte contre l'érosion, le contrôle des populations envahissantes, la régulation des ravageurs et des pathogènes ainsi que la régulation de la fertilité du sol. L'augmentation générale de la biodiversité (micro-organismes, flore et faune) liée à l'introduction de diversité végétale (Vandermeer, 1995) serait en grande partie à l'origine de ces services. La diversité des organismes du sol aurait un intérêt particulier pour la résilience des systèmes (Altieri, 1999).

i. Erosion

La lutte contre l'érosion est l'une des premières motivations de la mise en place du semis direct et des couverts. Les SCP apparaissent comme la conduite « ultime » pour lutter contre l'érosion. En effet, le couvert peut limiter la sensibilité du sol à l'érosion en le couvrant toute l'année, ralentir le ruissellement et stabiliser l'horizon de surface.

Une revue de la bibliographie réalisée dans le cadre d'une synthèse de l'ADEME sur les impacts des Techniques Culturelles sans Labour a montré qu'en comparaison avec le labour, l'érosion était réduite d'un facteur supérieur à 5 dans plus de 60 % des cas en TCSL, et que la variabilité importante des résultats était très liée à la présence d'une couverture du sol (vivante ou morte), qui réduit l'érosion d'un facteur 1 à 10. La couverture est efficace si elle représente au moins 25 à 40 % de la surface du sol. L'efficacité des TCSL pour réduire l'érosion en l'absence de couvert est controversée (Labreuche *et al.*, 2007). La présence d'un couvert est donc primordiale pour réduire l'érosion, même en semis direct dans certaines situations. Wall *et al.* (1990[13]) ont obtenu en sol labouré une réduction de 46 à 78 % des pertes de sol avec un couvert de trèfle violet sous maïs, par rapport au maïs seul. Hall *et al.* (1984 [14]) rapportent une réduction de 95 à 100 % du ruissellement, des pertes de sol et d'un pesticide en maïs sous couvert par rapport au témoin labouré. Il est probable qu'un couvert rampant ou bas et dense aura un effet semblable à celui d'une couche de résidus et sera plus efficace pour réduire le ruissellement qu'un couvert haut et clair.

ii. Structure du sol

En semis direct, une dégradation de la structure est souvent observée dans les horizons peu profonds, avec notamment une diminution de la porosité par rapport aux systèmes où le sol est travaillé. La porosité facilite l'activité des organismes du sol et la pénétration des racines, participe à la réserve utile en eau, à l'aération, au drainage et donc au bon fonctionnement des sols en général. Les systèmes racinaires de certaines plantes et l'augmentation du taux de matière organique du sol figurent parmi les pistes avancées pour améliorer la porosité de la surface du sol. Ainsi, il semble que les couverts pérennes pourraient participer à limiter la perte de porosité observée en travail du sol réduit. Les espèces de légumineuses pérennes ont des caractéristiques qui font d'elles de bonnes candidates pour l'amélioration de la structure du sol (leur racine pivotante ou leur chevelu racinaire dense, la stimulation des organismes du sol). Le SCP améliore la stabilité dans le temps de la conductivité hydraulique et de la porosité, surtout la macroporosité jusque 20 cm (Carof *et al.*, 2007c, De Tourdonnet, 2008 [8]). Le couvert a protégé la structure du sol, qui a moins fluctué que dans sous le témoin sol nu. La quantité et la stabilité des macro-agrégats sont généralement favorisées par le couvert (Jokela *et al.*, 2009, [17]).

iii. Organismes du sol

La présence d'un couvert accentue les effets bénéfiques du non labour sur la majorité des organismes du sol. La biomasse et la diversité des vers de terre sont augmentées (O. Schmidt *et al.*, 2001). De plus, la couche de matière organique à la surface du sol favorise les protozoaires, la mésofaune (nématodes, acariens et collemboles) et les micro-organismes (champignons et bactéries) (Nakamoto et Tsukamoto, 2006 ; Jokela *et al.*, 2009, [17]).

L'augmentation de l'activité biologique du sol améliore sa structure, sa stabilité et accélère le taux de renouvellement et la décomposition de la matière organique. Jokela *et al.* (2009 [17]) ont remarqué une augmentation de la fraction labile du carbone. De plus, certains organismes comme les champignons mycorrhiziens arbusculaires peuvent participer à la nutrition des cultures (Deguchi *et al.*, 2007 ; Frey et Schüepp, 1992). Dans les systèmes sans travail du sol, on remarque une augmentation du ratio de la biomasse fongique sur la biomasse bactérienne. D'après Hodge *et al.* (2000), ceci pourrait permettre de limiter l'immobilisation de l'azote.

iv. Bioagresseurs

La présence continue du couvert dans le système de culture va également modifier les populations d'organismes bénéfiques comme des nuisibles. Elle engendre une absence de « rupture sanitaire » (Jérôme Labreuche, 2011a), mais peut également avoir un impact positif contre les ravageurs et les pathogènes par la « dilution » de la culture ou un effet barrière (Lithourgidis *et al.*, 2011). Pour Hubert Charpentier, agriculteur expérimenté en SCP, la présence d'un couvert est équivalente à l'effet rotation contre les bioagresseurs (Seysen-Fouan, 2012).

En ce qui concerne les **insectes**, Schmidt *et al.* (2007) ont dénombré 45 % d'ennemis naturels du puceron *Aphis glycines* en plus dans un soja associé à un couvert de Luzerne, ce qui a causé un retard au développement du ravageur et une forte diminution des pics de population. Gravesen (2008) a observé beaucoup plus d'araignées en SCP du fait des ressources alimentaires (collemboles) accrues par la matière organique à dégrader. Jean-Philippe Turlin de la Chambre d'Agriculture du Finistère a observé la présence de 20 % de carabes en plus dans un colza associé au trèfle blanc, dont certains sont prédateurs des limaces (Rychembusch, 2014). Hartwig et Ammon (2002) rapportent que l'effet de l'augmentation des ennemis naturels des ravageurs est conséquent. Dans l'essai mené par l'INRA à Grignon en revanche, la présence tout au long de l'année de la fétuque aurait favorisé l'infestation par la mouche grise du blé (*Delia coarctata*). Il semble donc que le couvert ait globalement un effet positif sauf dans des cas particuliers, notamment si l'espèce de couvert est hôte du ravageur.

Les **limaces et rongeurs** sont souvent favorisés par le semis direct et les couverts et constituent un frein important au développement de ces pratiques (Waligora, 2012 ; Bieri *et al.*, 2010). Des approches de rétablissement des populations de prédateurs, de piégeage ou de lutte chimique existent, et une piste complémentaire est le pouvoir répulsif de certains couverts. L'acide cyanhydrique de certains trèfles pourraient avoir un effet sur les limaces (Archambeaud, 2004). Les coumarines du mélilot (Waligora, 2014) et la plante *Limnanthes alba* (revue TCS, 2007) permettraient de contrôler les populations de rongeurs à des niveaux acceptables. L'efficacité des plantes de service reste à vérifier dans la diversité des situations rencontrées.

Les problèmes d'**organismes pathogènes** peuvent être réduits par le couvert. Selon Gibson *et al.* (2006), l'intégration du trèfle violet dans une rotation incluant du maïs et du soja permet de réguler la chrysomèle des racines du maïs (*Diabrotica virgifera*) et le nématode du soja (*Heterodera glycines*). Un couvert dense pourrait réduire l'infection par des champignons dont les spores proviennent du sol et sont amenées sur la culture par effet splash, comme la fusariose. Lithourgidis *et al.* (2011) citent une réduction de l'incidence du piétin-échaudage sur blé associé à la minette. En revanche, certaines maladies des cultures de légumineuses peuvent être favorisées par la présence du couvert si celui-ci est hôte. La plupart des légumineuses sont notamment hôtes de *Sclerotinia sclerotinorum* et participent donc à sa multiplication.

v. Adventices

Le contrôle des adventices est un des grands challenges auxquels font face les agriculteurs qui travaillent en non-labour (Hiltbrunner, *et al.*, 2007b). Les communautés d'adventices peuvent réagir assez rapidement à des modifications du système. L'utilisation de plantes vivantes couvrant le sol entre les rangées des cultures a été proposée pour un contrôle des adventices avec de bonnes performances environnementales (Teasdale, 2013). Trois mécanismes de contrôle préventif des adventices existent : réduction de la banque de semences du sol, limitation de la germination et de l'émergence, retardement du développement et de la croissance par compétition. Les couverts pérennes peuvent jouer sur les deux derniers points et indirectement sur le premier : la germination est réduite par l'absence de travail du sol et le manque de lumière sous le couvert, et la complémentarité de la culture commerciale et de la plante de couverture peut amener à acquérir une plus grande quantité de ressources qu'une culture commerciale seule, ce qui réduit les ressources disponibles pour les adventices (Hauggaard-Nielsen et Jensen, 2005). La qualité altérée de la lumière et l'amplitude de températures réduite font qu'un couvert pérenne est plus efficace qu'un mulch mort (Teasdale et Daughtry, 1993).

L'allélopathie est également une piste pour le contrôle des adventices. Il s'agit de l'inhibition de la croissance d'une plante par des composés chimiques libérés dans le sol par une plante voisine. La luzerne produirait des composés allélopathiques (Ayub *et al.*, 2012). Il n'existe pas vraiment de consensus scientifique sur ce sujet (Seavers et Wright, 1999), et il faudrait être attentif aux effets sur les cultures.

Seavers et Wright (1999) ont montré que les traits qui influencent le contrôle des adventices sont principalement la surface foliaire, la hauteur et la vitesse de couverture du sol. N'importe quel couvert pérenne assez compétitif pour avoir un effet sur les adventices aura aussi un effet sur la croissance et le rendement de la culture (Teasdale, 2013 ; White et Scott, 1991). De même, si la culture est très compétitive sur les adventices, elle le sera également avec le couvert, ce qui peut poser problème notamment pour le choix de l'année d'implantation.

Des adventices peuvent échapper à l'effet du couvert si elles sont capables d'accéder aux ressources malgré la compétition ou si elles évitent la période pendant laquelle le couvert est compétitif (Teasdale, 2003). De fait, les couverts pérennes peuvent avoir un contrôle sélectif sur les adventices, ce qui signifie qu'une augmentation des densités de population de certaines espèces est possible et à surveiller (Hiltbrunner *et al.*, 2007a [12]).

(Hiltbrunner *et al.*, 2007a [12]) ont montré que les couverts pouvaient réduire de manière conséquente la diversité et la densité des adventices sous blé, avec des résultats variables selon le couvert et les adventices. Ils ont noté jusqu'à une réduction de moitié de la diversité des adventices et d'un facteur 10 de la densité. Thorsted *et al.* (2002) [15] et Poyac *et al.* (2013) [16] ont conclu que le trèfle blanc ne limitait pas le développement des adventices. Pour Carof, (2006 [8]), sans contrôle du couvert, les légumineuses se sont avérées plus efficaces que les graminées pour concurrencer les adventices. Pour Jean-Luc Baron, agriculteur, le désherbage est allégé sous trèfle blanc : il rencontre surtout des vivaces car il utilise du glyphosate pour réguler le trèfle, qui est compétitif sur les adventices (Rychembusch, 2014). Den Hollander *et al.* (2007) et Ross *et al.* (2001) mettent en évidence les différences entre espèces de trèfles pour le contrôle des adventices et ainsi le besoin de réaliser des expérimentations les comparant.

Annexe 5 : Effet du couvert sur les nutriments autres que l'azote

Un couvert de légumineuse prélève dans le sol pour son développement tous les nutriments à part l'azote. Les légumineuses sont notamment de grosses consommatrices de soufre. Le couvert va donc exercer de la compétition dans des situations où l'azote n'est pas limitant et le sol est pauvre en P, K ou micro-nutriments (Waligora et Thomas, 2014).

Le couvert peut favoriser la nutrition de la culture par la **stimulation des mycorhizes**. Les réseaux de mycorhizes peuvent participer au transfert de nutriments entre plantes. (Frey et Schüepp, 1992, Johansen, et Jensen, 1996). Cependant, le transfert d'azote ou de Phosphore entre deux plantes vivantes par les mycorhizes se ferait en proportions négligeables (Johansen, et Jensen, 1996). La voie majeure par laquelle les hyphes mycorhiziens pourraient favoriser le transfert entre plantes serait plutôt par transfert des nutriments depuis des racines en décomposition d'une légumineuse pérenne. Il a été montré que l'association d'un couvert pérenne favorisait les mycorhizes et permettait une meilleure nutrition en phosphore du maïs (Deguchi *et al.*, 2005) ; (Deguchi *et al.*, 2007)

Autre effet potentiel de l'intégration d'une légumineuse : la fixation de diazote atmosphérique induit la libération de protons dans le sol, ce qui réduit son pH. L'assimilation de nitrates induit plutôt une élévation du pH du sol. Les légumineuses ont donc tendance à plus acidifier les sols que les non-légumineuses. Ceci conduit à la solubilisation de P, K, Ca et Mg, dont peut alors bénéficier l'autre plante de l'association (H. Hauggaard-Nielsen et Jensen, 2005). Cet effet est à relativiser car d'autres éléments peuvent devenir moins disponibles lors de l'acidification du sol.

L'exsudation de phosphatases par des plantes en conditions de nutrition phosphatée limitante peut accélérer la libération de phosphore depuis des sources où il était fixé, ce qui peut améliorer la nutrition phosphatée des deux espèces si les racines sont bien mélangées.

Enfin, si les racines du couvert explorent le sol sur une profondeur plus importante que la culture, comme c'est probablement le cas avec une luzerne pérenne, le couvert peut ramener plus en surface des nutriments via la dégradation de sa biomasse.

Annexe 6 : opérations culturales sur l'essai TBSSBTH

Date	conduite
avant l'orge de printemps	labour
printemps-été 2012	orge de printemps
août-12	implantation du trèfle blanc (variété Aberdai)
avr-13	implantation du maïs grain en semis direct, trèfle maintenu vivant
31/10/13	récolte du maïs (sans broyage)
18/11/13	broyage des résidus de maïs, trèfle maintenu vivant
27/11/13	semis direct du blé dans les résidus de maïs ; semoir Easydrill, écartement 16,6 cm ; variété Pakito; 160 kg/ha : 320 grains par m ² ; trèfle maintenu vivant
06/03/13	fertilisation : Ammonitrate 180 kg/ha : 60 unités
12/03/14	désherbage et régulation du trèfle : Platform 40 WG (carfentrazone-éthyle) à 10 g/ha
24/03/13	fertilisation : Ammonitrate 400 kg/ha : 134 unités
31/03/14	désherbage et régulation du trèfle : Chardol (2,4D 600 g/L) à 1,4 L/ha
13/05/14	Fongicide : Adexar 0.7 l/ha
30/05/14	Fongicide : Prosaro 0.6 l/ha
31/07/14	récolte du blé à la moissonneuse-batteuse d'expérimentation ; trèfle maintenu vivant

Annexe 7 : *Résultats et commentaires sur l'essai TBSSMG (2013, précédent de TBSSBTH)*

L'essai TBSSBTH fait suite à l'essai Trèfle Blanc sous Maïs Grain qui a eu lieu sur la même parcelle en 2013. Les trois bandes de trèfle blanc (variété Aberdai) ont été implantées le 23/08/12 après déchaumage du précédent orge de printemps le 13/08/12 sur toute la parcelle. Le maïs grain a été semé le 23/04/13 en direct après une application de Glyphosate (540 g/ha), sans destruction du trèfle sur le rang. L'essai a été conduit en conditions limitantes : dose d'azote réduite de 80 unités, pas d'irrigation après le 20/7. Le maïs grain a été récolté le 31/10.

Les résultats ont été les suivants :

	Maïs seul	Maïs associé au trèfle blanc
Levée :	81.7 % de levée (A)	97.5 % (A)
Rendement :	92.7 q/ha à 15% (A)	56.5 q/ha (B)
Humidité récolte :	25.4 % à la récolte (A)	27.2 % (A)
PMG :	255 g à 15% (A)	239 g (A)
Grains/plante :	445 gr/pl	270 gr/pl

La meilleure levée sous le couvert a déjà été observée, elle pourrait être due à une humidité ou à une structure du sol plus favorables. Dans ces conditions, le rendement du maïs a presque été réduit de moitié par le couvert de trèfle, qui était pourtant assez court sous le maïs, même s'il offrait une bonne couverture du sol. La composante du rendement qui a été affectée est le nombre de grains par plante, ce qui peut indiquer une compétition pour l'azote vers le stade floraison femelle ou SLAG (Limite d'Avortement des Grains). Les conditions limitantes ont aggravé la compétition. Une hypothèse est que l'azote a été consommé par le jeune trèfle, qui était ombragé. Un jaunissement des feuilles en bas du maïs a été observé. Le suivi tensiométrique a permis de faire apparaître une plus faible quantité d'eau consommée par l'association par rapport au maïs seul, liée au moindre rendement du maïs associé. Le manque d'eau à partir du stade floraison femelle ne semble donc pas expliquer la compétition. Il aurait peut-être été judicieux de détruire le trèfle sur le rang de maïs par strip-till ou application localisée d'herbicide.

Des éléments sont à prendre en considération pour l'analyse de l'essai TBSSBTH : il y a eu beaucoup moins de maïs sur les bandes où est implanté le trèfle, il y a donc eu moins de prélèvements d'azote du sol et il y a moins de résidus (impacts sur levée, nutrition,...).

Annexe 8 : Dates des stades du blé de l'essai TBSSBTH

semis	levée	épi 1cm	1 nœud	2 nœuds	Dernière feuille	épiaison	floraison	grain laiteux	grain pâteux	maturité	Récolte possible
27/11/2013	28/12	28/03	07/04	16/04	01/05	18/05	26/05	14/06	02/07	04/07	22/07

source : calcul à partir des données météorologiques de l'année, logiciel AgroDemo

Annexe 9: Mesures réalisées sur l'essai TBSSBTH

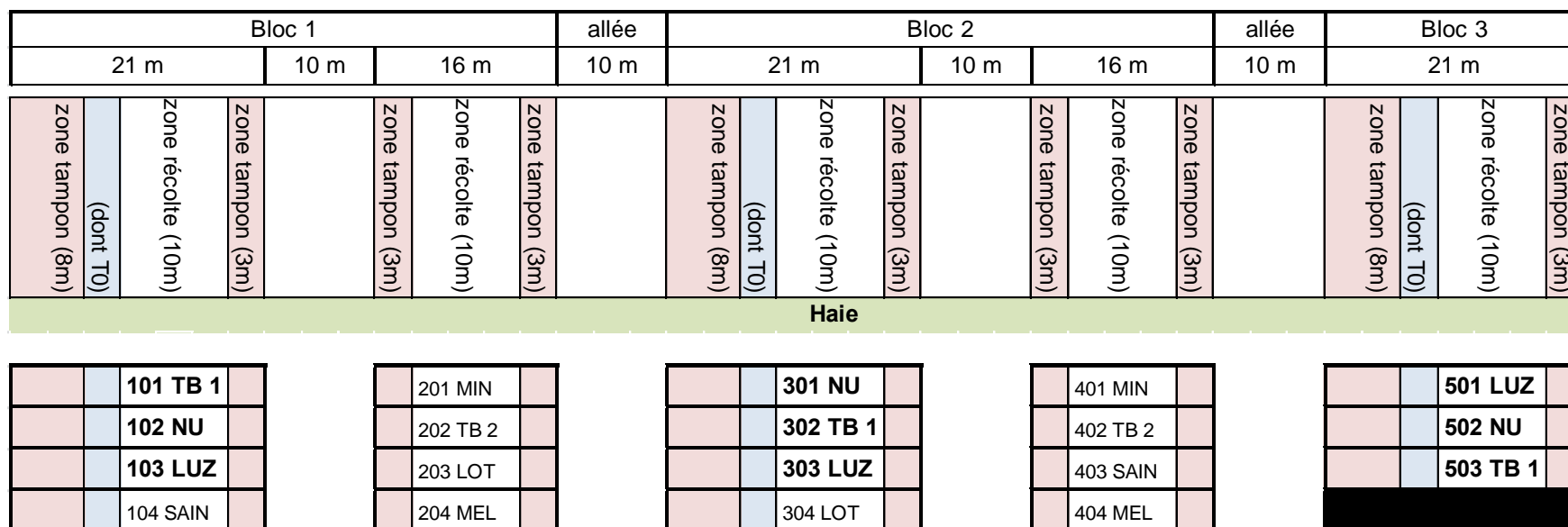
Date	mesures	modalités concernées et surface de prélèvement
23/10/13	MS et Nabs trèfle	CP ; 3*0.25 m ² par parcelle
11/02/14	MS et Nabs blé, MS et Nabs trèfle (stolons inclus)	T, CP ; 3*0.334 m ² par parcelle
février	comptage de la levée du blé	T, CP
18/02/14	reliquat azoté	T, CP
19/03/14	MS et Nabs blé, MS et Nabs trèfle (épi 1cm)	T, CP (doses X) ; 3*0.334 m ² par parcelle
29/04/14	MS et Nabs blé, MS et Nabs trèfle (2 nœuds)	T, CP (doses X) ; 3*0.25 m ² par parcelle
26/05/14	hauteurs	T, CP (doses X et T0)
03/06/14	MS et Nabs blé, MS et Nabs trèfle (floraison)	T, CP (doses X et T0) ; 3*0.25 m ² par parcelle
11/07/14	épis/m ²	T, CP (doses X)
24/07/14	MS et Nabs blé, MS et Nabs trèfle	T, CP (doses X et T0) ; 3*0.25 m ² par parcelle
31/07/14	rendement, humidité, PMG	T, CP (doses X)
août	reliquat après récolte	T, CP (doses X et T0)

MS : quantité de matière sèche ; Nabs : pourcentage d'azote des parties aériennes

Annexe 10 : Opérations culturales sur l'essai Impacts

Date	conduite	modalités concernées	remarques
05/07/2013	destruction chimique de la jachère (glyphosate 1080 g/ha + 2,4D 600 g/ha,)	toutes	
12/07/2013	labour ; herse rotative + semoir (Kuhn Integra) : 2 passages, un pour préparer puis le second pour préparer et semer les couverts	toutes	temps sec après le semis des couverts et forte pluie (32 mm le 25/7) : formation d'une croûte de battance avant la levée des couverts
30/08/2013	désherbage manuel des couverts (le 30/08/14 et début septembre)	toutes	
13/09/2013	glyphosate (N-(phosphonométhyl)glycine) à 1440 g/ha	sol nu, trèfle blanc, mélilot, sainfoin et les allées inter-blocs	Beaucoup d'adventices ; volonté de détruire certaines parcelles. Couverts non tués
18/10/2013	glyphosate à 1440 g/ha	sol nu, trèfle blanc, mélilot, sainfoin	Beaucoup d'adventices ; volonté de détruire certaines parcelles. Couverts non tués
18/10/2013	glyphosate à 720 g/ha	luzerne, minette et lotier	dose moindre sur les parcelles des couverts que l'on pensait garder
22/10/2013	semis direct du blé (Semeato TDNG, variété Pakito, 140 kg/ha, 285 gr/m ² , antilimace sur le sol (Metarex 5kg/ha)	toutes	Conditions semi-plastiques, entraînant un dénivellement du terrain après semis (sur labour) et une levée hétérogène du blé (traces de roues du tracteur moins bien levées)
13/11/2013	désherbage : Trooper (60 g/l de flufénacet et 300 g/l de pendiméthaline) à 2.5 l/ha	toutes	pas d'effet sur les légumineuses
19/02/2014	désherbage : Harmony SX (4% de metsulfuron-méthyle et 40% de thifensulfuron-méthyle) à 30 g/ha	toutes	Tentative de destruction de vivaces (plantain, pissenlit), effet sur certaines légumineuses
06/03/2014	fertilisation : Ammonitrate 180 kg/ha : 60 unités de N	toutes (sauf T0)	
06/03/2014	fertilisation : Kiesérite 138 kg/ha, soit 69 U de SO3 et 35 U de MgO	toutes	
12/03/2014	Désherbage : Platform 40 WG (carfentrazone-éthyle) à 10 g/ha	toutes	effet sur certaines légumineuses
24/03/2014	fertilisation : Ammonitrate 240 kg/ha : 80 unités de N	toutes (sauf T0)	
31/03/2014	désherbage : Chardol à 1L/ha	LUZ, MEL, MIN, SAIN sauf Bloc 3	parcelles où le couvert concurrencerait le blé les semaines suivantes ; Peu de luzerne dans le bloc 3
13/05/2014	fongicide : Adexar 0.7		
30/05/2014	fongicide : Prosaro 0.6		
31/07/2014	récolte du blé à la moissonneuse-batteuse d'expérimentation	Toutes (dose X)	

Annexe 11 : Plan de l'essai Impacts et description des modalités



Nord ↖

Espèce de couvert (abréviation)	Variété (semencier)	Densité de semis (kg/ha)
Sol nu (NU)		
Luzerne méditerranéenne (<i>Medicago sativa</i>) (LUZ)	Melissa (Jouffray Drillaud)	10.8
Trèfle blanc intermédiaire (<i>Trifolium repens</i>) (TB1)	Haïfa (Carneau)	3.3
Sainfoin (<i>Onobrychis viciifolia</i>) (SAIN)	Perly (Jouffray Drillaud)	21 (graines non décortiquées)
Minette (<i>Medicago lupulina</i>) (MIN)	Virgo (Carneau)	15.6
Lotier corniculé (<i>Lotus corniculatus</i>) (LOT)	Léo (Carneau)	22
Mélilot officinal (<i>Melilotus officinalis</i>) (MEL)	J5 (Carneau)	11
Trèfle blanc intermédiaire (<i>Trifolium repens</i>) (TB2)	Aberdai (Jouffray Drillaud)	3.3

Annexe 12 : *Dates des stades du blé dans l'essai Impacts*

semis	levée	épi 1cm	1 nœud	2 nœuds	Dernière feuille	épiaison	floraison	grain laiteux	grain pâteux	maturité	Récolte possible
22/10/2013	03/11	14/03	29/03	05/04	21/04	11/05	19/05	09/06	27/06	29/06	18/07

source : calcul à partir des données météorologiques de l'année, logiciel AgroDemo

Annexe 13 : *mesures réalisées dans l'essai Impacts*

Date	mesures	modalités concernées et surface de prélèvement
03/09/2013	reliquats azotés	NU ; un prélèvement par horizon et par bloc
21/10/2013	MS et Nabs couverts	LUZ, MIN, LOT, adventices ; 3*0.25 m ² par parcelle
23/10/2013	reliquats azotés	NU, LUZ, MIN, LOT
janvier	levée du blé	toutes
11/02/2014	MS et Nabs couverts ; MS et Nabs blé	NU, LUZ, TB1 ; 3*0.25 m ² par parcelle
18/02/2014	reliquats azotés	NU, LUZ, TB1
20/03/2014	MS blé et couverts, Nabs	NU, LUZ, TB1 (dose X) ; 1*0.352 à 0.44 m ² par parcelle
20/03/2014	hauteur blé et couvert	toutes (dose X)
24/04/2014	hauteur blé et couvert	toutes (dose X et T0)
19/05/2014	hauteur blé	toutes (dose X et T0)
19/05/2014	hauteur couvert	LOT 304 (dose X et T0)
11/07/2014	comptage épis/m ²	NU, LUZ, TB1 (dose X)
16/07/2014	hauteur blé et couvert	LOT (dose X et T0)
24/07/2014	MS et Nabs blé	Toutes (dose X et T0) ; 3*0.25 m ² par parcelle
31/07/2014	Rendement, humidité, PMG	Toutes (dose X)
août	Reliquat après récolte	NU, LUZ, TB1 (dose X et T0)

Abstract

Interest for legume living mulch cropping systems is growing among reduced tillage farmers in France. It has been shown that these perennial legume cover crops can control weeds, improve soil structure and build up soil Nitrogen. Living mulches can have highly competitive effects but in some cases they benefit crops by changing the amount of available resources. This MSc Thesis reviews competitive and facilitative interactions for water, nitrogen and light and their influence on crop yield in living mulch systems. Cover crop functional traits clearly affect complementarity with the main crop in time and space. Two field trials with winter wheat as a main crop highlighted strong effects of crop establishment and crop soil cover on crop competitiveness. More accurate knowledge is needed before this system can be adopted by more farmers and this study leads to other trials that will benefit from the experience gained in management of living mulch system complexity.

Keywords : living mulch – trophic relations – legume cover crop – reduced tillage – winter cereals – cropping system

Résumé

De plus en plus d'agriculteurs pratiquant la réduction du travail du sol s'intéressent à la mise en place de systèmes intégrant une légumineuse pérenne. Cette plante de service couvre le sol sous certaines cultures de la rotation. Elle peut aider à contrôler les adventices, améliorer la structure du sol ou encore apporter de l'azote. Les couverts peuvent exercer une forte compétition ou au contraire améliorer les conditions de développement de la culture. Ce mémoire synthétise les connaissances sur les relations de compétition et de facilitation pour les principales ressources (eau, azote et lumière) en exposant les mécanismes qui ont un impact sur le rendement de la culture associée. S'il est clair que les caractéristiques du couvert déterminent sa complémentarité avec la culture dans le temps et dans l'espace, l'analyse de deux essais mettant en œuvre un blé tendre d'hiver, dans des situations contrastées, illustre que la densité de peuplement de la culture est un des premiers facteurs qui conditionnent sa compétitivité sur le couvert l'association. Ceci confirme que le second point critique est l'ajustement du fin équilibre entre les espèces : la qualité de l'implantation et les interventions en cours de culture doivent maintenir les bénéfices apportés par le couvert. L'accumulation de références permettra la diffusion de ce système à un plus grand nombre d'agriculteurs lorsqu'il sera suffisamment maîtrisé.

Mots-clés : couvert pérenne – systèmes de culture – interactions trophiques - couvert de légumineuse - réduction du travail du sol – céréales d'hiver