

# Produire des légumineuses à graines au moyen de l'association avec une céréale : cas de la lentille et du lupin blanc d'hiver

Nicolas Carton, Loic Viguier, Laurent Bedoussac, Etienne-Pascal Journet, Christophe Naudin, Guillaume Piva, Gwénaëlle Corre-Hellou, Eric Justes

▶ **To cite this version:**

Nicolas Carton, Loic Viguier, Laurent Bedoussac, Etienne-Pascal Journet, Christophe Naudin, et al.. Produire des légumineuses à graines au moyen de l'association avec une céréale : cas de la lentille et du lupin blanc d'hiver. Innovations Agronomiques, 2019, 74, pp.129-141. 10.15454/xfdvdp . hal-02154633

**HAL Id: hal-02154633**
**https://hal.science/hal-02154633**

Submitted on 12 Jun 2019

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

*Innovations Agronomiques 74 (2019), 129-141*

# Produire des légumineuses à graines au moyen de l'association avec une céréale : cas de la lentille et du lupin blanc d'hiver

**Carton N.[1,2], Viguier L.[1,3,4], Bedoussac L.[5], Journet E.-P.[3,6], Naudin C.[1], Piva G.[1], Corre-Hellou G.[1], Justes E.[3,7]**

[1] USC LEVA, INRA, Ecole Supérieure d'Agricultures, Univ. Bretagne Loire, SFR 4207 QUASAV, Angers, France

[2] Adresse actuelle : Department of Biosystems and Technology, Swedish University of Agricultural Sciences, Alnarp, Suède

[3] AGIR, Université de Toulouse, INRA, Castanet-Tolosan, France

[4] Qualisol, 851 chemin de Carrel, BP 67, F-82102 Castelsarrasin Cedex

[5] AGIR, Université de Toulouse, INRA, ENSFEA, Castanet-Tolosan, France

[6] LIPM, Université de Toulouse, INRA, CNRS, Castanet-Tolosan, France

[7] Adresse actuelle : CIRAD, UMR SYSTEM, Univ Montpellier, CIHEAM-IAMM, CIRAD, INRA, Montpellier SupAgro, Montpellier, France

**Correspondance :** nicolas.carton@slu.se

Nicolas Carton et Loïc Viguier ont contribué de manière équivalente à ces travaux. Nicolas Carton and Loïc Viguier contributions to this article are equivalent.

## Résumé

Les légumineuses à graines présentent de nombreux avantages nutritionnels, agronomiques, et environnementaux et sont au cœur des enjeux de durabilité des systèmes de cultures. Pourtant, elles sont peu cultivées en Europe, notamment en raison de verrous agronomiques majeurs (bioagresseurs dont les adventices, verse) qui réduisent les rendements et les rendent instables. Deux thèses ont été réalisées pour 1) étudier l'intérêt d'ajouter des céréales (blé, triticale) dans les cultures de légumineuses (lentille et lupin blanc d'hiver) pour lever ces verrous agronomiques ; 2) mieux comprendre le fonctionnement de ces associations pour en améliorer les performances.

L'ajout d'une faible densité de céréale dans les cultures de ces légumineuses a permis d'augmenter le rendement total par rapport aux cultures pures dans pratiquement toutes les situations testées. La meilleure performance des associations était principalement liée à une meilleure acquisition des ressources (lumière et azote) grâce à des complémentarités entre espèces. La présence de la céréale a également fortement diminué la biomasse des adventices et l'incidence de la verse. Ajouter une céréale dans une culture de légumineuse à graine est donc une stratégie pertinente pour développer la production de légumineuses.

**Mots-clés** : Association légumineuses-céréales, Adventices, Compétition, Complémentarité, Performance économique.

## Abstract: Grain legume production using legume-cereal intercrops: case study of lentil and winter white lupin

Grain legumes provide numerous nutritional, agronomic and environmental benefits and are at the core of the sustainability challenges of agricultural systems. Yet, grain legumes are hardly cultivated in Europe, not least because of strong agronomic constraints that reduce their yields and increase yield

instability. Two PhD theses were performed to 1) assess the potential of intercropping cereals (wheat, triticale) with grain legumes (lentil and winter white lupin) to reduce the impacts of agronomic constraints on legume production; 2) better understand the functioning of these intercrops to improve their agronomic and economic performances.

Intercropping legumes with a low density of cereal increased total grain yield in almost all tested situations compared to sole crops. The better global performance of intercrops was mainly due to a higher acquisition of light and nitrogen resources resulting from complementarities between species within the intercrops. Moreover, the presence of the cereal reduced weed biomass and lentil lodging. Intercropping legumes with cereals is thus a suitable agricultural practice to foster grain legume production in Europe.

**Keywords:** Legume-cereal intercrops, Weeds, Competition, Complementarity, Economic performance.

## 1. Introduction

### *1.1 Enjeux des légumineuses à graines en Europe*

Les légumineuses à graines (légumes secs et protéagineux) présentent de nombreux avantages nutritionnels et environnementaux mais sont peu cultivées en Europe (1.5% de la surface arable européenne en 2014 ; Watson *et al.,* 2017). L'Europe importe donc une grande partie de ses besoins en légumineuses et protéines végétales avec par exemple, une dépendance aux importations de 74% pour la lentille (FAO, 2018) et de 70% pour les aliments riches en protéines destinés à l'alimentation animale (Schreuder et De Visser, 2014). Cela explique la volonté de l'Europe de mettre en œuvre des incitations à la production de légumineuses à graines dans sa politique agricole commune pour réduire cette dépendance et favoriser la diversification des espèces cultivées (European Commission, 2018).

Du point de vue agronomique, l'intégration des légumineuses dans les systèmes de culture p ermet des économies d'intrants azotés à l'échelle de la rotation par rapport à des successions majoritairement constituées de céréales du fait de leur capacité à fixer le diazote de l'air via une symbiose (Peoples *et al.*, 2009, Preissel *et al.*, 2015). Par conséquent, un accroissement des surfaces cultivées en légumineuses permettrait de réduire les émissions directes et indirectes de gaz à effet de serre ($C0_2$ et $N_20$) en 1) réduisant l'énergie nécessaire pour fabriquer, distribuer et épandre les engrais azotés de synthèse et 2) réduisant les importations de soja pour l'alimentation animale, et donc les émissions de $CO_2$ associées.

De plus, l'intégration de légumineuses permet d'augmenter la diversité des systèmes de grandes cultures permettant de rompre le cycle de certains pathogènes et ainsi de réduire le recours aux pesticides à l'échelle de la rotation (Peoples *et al.*, 2009 ; Angus *et al.*, 2015).

### *1.2 Principaux freins à la culture des légumineuses à graines*

La faible adoption des cultures de légumineuses à graines en Europe s'explique par des niveaux de rendements faibles comparés aux céréales fertilisées, non compensés par des prix de vente suffisamment élevés. De plus, les légumineuses présentent une plus grande variabilité de rendement que la majorité des autres cultures (Cernay *et al.*, 2015 ; Reckling *et al.*, 2015). Cet argument est souvent cité par les agriculteurs comme une raison pour leur préférer d'autres cultures dont le résultat économique est plus sécurisé (Voisin *et al.*, 2014 ; Zander *et al.*, 2016). Par ailleurs, les légumineuses ont été relativement peu étudiées et ont, pendant longtemps, reçu moins d'investissements notamment en termes de sélection génétique que les espèces les plus cultivées comme le blé, l'orge ou le maïs (Voisin *et al.*, 2014 ; Magrini *et al.*, 2016). Ceci peut expliquer en partie leur relative sensibilité à de nombreux facteurs abiotiques (anoxie, stress hydriques et thermiques, verse) et biotiques (ravageurs,

maladies cryptogamiques, virus et adventices) car les efforts d'amélioration des plantes ont été plus faibles et disséminés que pour les céréales.

La lentille (*Lens culinaris*) et le lupin blanc (*Lupinus albus*) sont deux cultures représentatives de cette situation paradoxale des légumineuses à graines. En effet, elles pourraient apporter de multiples services aux systèmes agricoles et alimentaires mais sont peu cultivées à cause de ces différents facteurs qui limitent et réduisent leurs rendements. Ainsi, ces deux espèces exercent peu de compétition vis-à-vis des adventices par rapport à la plupart des cultures comme les céréales, expliquant l'occurrence de fortes biomasses d'adventices, notamment lorsque les possibilités de désherbage en culture sont réduites (conduite bas intrants et agriculture biologique), ce qui peut conduire à une perte de rendement, qui est parfois très forte (Lutman *et al.*, 1994 ; Lemerle *et al.*, 1995). Dans certains cas, des ravageurs et des maladies cryptogamiques peuvent également provoquer des pertes majeures de rendements, jusqu'à des récoltes nulles, comme par exemple la bruche (*Bruchus lentis* et *B. signaticornis*), un coléoptère dont les larves se nourrissent des graines, chez la lentille et l'anthracnose (*Colletotrichum lupini*) pour les deux espèces (Carr *et al.*, 1995 ; Talhinhas *et al.*, 2016 ; Viguier *et al.,* 2018).

Pour autant, la lentille et le lupin ont récemment bénéficié d'un regain d'intérêt de la part des acteurs agricoles (chercheurs, coopératives et agriculteurs) en raison de marchés émergents pour l'alimentation humaine (lentille et lupin) et animale (lupin). Il convient donc de trouver des façons de faciliter leur intégration dans les systèmes de culture en réfléchissant à la conception d'itinéraires techniques qui permettent de réduire ou lever une partie des verrous agronomiques de ces légumineuses, notamment dus aux bio-agresseurs et à la verse.

### *1.3 Associer les légumineuses à des céréales pour produire des protéines ?*

Une des solutions pour améliorer les performances des légumineuses à graines en condition de mélanges d'espèces appelée culture associée, laquelle a été définie comme la culture d'au moins deux espèces sur la même parcelle durant une période significative de leur croissance (Willey, 1979).

La culture des légumineuses en association avec des céréales est une solution largement analysée par les agronomes depuis de nombreuses années, et est reconnue efficace pour : i) augmenter et stabiliser les rendements totaux à l'hectare (Bedoussac *et al.*, 2015 ; Raseduzzaman et Jensen, 2017), ii) réduire le développement des adventices par rapport aux cultures pures de légumineuses (Liebman et Dyck, 1993 ; Corre-Hellou *et al.*, 2011), et iii) accroître les marges brutes en situations à bas niveaux d'intrants et agriculture biologique (Bedoussac *et al.*, 2015). Une partie de ces intérêts s'explique par les complémentarités entre espèces pour l'acquisition de l'azote de l'air et du sol et la réduction du développement et de la nuisibilité des bio-agresseurs (Jensen, 1996 ; Hauggaard-Nielsen *et al.*, 2009).

Lorsque les associations sont cultivées pour produire des légumineuses à graines, l'espèce associée peut être considérée comme une plante « compagne » ou de « service » par exemple avec un rôle de tuteur pour limiter la verse de la légumineuse. Dans ce cas, le protéagineux est généralement semé à une densité proche de sa densité recommandée en culture pure alors que l'espèce qui lui est associée est semée à une faible densité (15 à 30% de sa densité en culture pure ; Corre-Hellou *et al.*, 2013). Cette faible densité de la plante « compagne » vise en premier lieu à réduire la nuisibilité des bio-agresseurs qui limitent la production du protéagineux en culture pure, en exerçant une compétition sur les adventices, ou en agissant comme une barrière physique à la propagation des maladies par exemple, sans induire un niveau trop élevé de compétition sur la légumineuse. De plus, la production de grains par l'espèce associée vise à compléter celle du protéagineux, qui est réduite par la compétition de la plante associée, et ainsi à accroitre la production totale. Ainsi, l'espèce associée sert également à sécuriser le rendement total, ce qui est particulièrement appréciable et efficace dans les

systèmes à bas intrants et en agriculture biologique et dans le contexte de conditions climatiques de plus en plus variables.

### *1.4 Deux thèses pour étudier les performances des associations*

Deux thèses ont été réalisées entre 2014 et 2018 sur : 1) le lupin blanc d'hiver (Nicolas Carton dans l'équipe LEVA de l'ESA Angers Loire, au sein du projet PROGRAILIVE[1], Carton, 2017) et 2) sur la lentille semée au printemps (Loïc Viguier à l'INRA de Toulouse, en partenariat avec la coopérative Qualisol, Viguier, 2018). Ces deux thèses visaient à étudier l'intérêt des cultures associées et à analyser leur fonctionnement pour optimiser les itinéraires techniques pour *in fine* améliorer les performances agronomiques et économiques de ces associations. En particulier il s'agissait de lever certains verrous agronomiques des légumineuses pures à savoir : 1) adventices et variabilité du rendement chez le lupin et 2) adventices, bruches et verse chez la lentille.

Les deux thèses ont été réalisées dans des contextes de pédo-climats, d'espèces et de débouchés différents mais avec des dispositifs et des objectifs similaires et complémentaires. Concernant l'association lupin blanc d'hiver-céréale, des essais ont été menés en réseau de parcelles et un essai factoriel répété deux ans en station d'expérimentation. Le réseau de parcelles a consisté en la comparaison d'associations additives lupin blanc d'hiver-triticale et lupin blanc d'hiver pur sur 6 sites en 2015 et 5 sites en 2016 en région Pays-de-Loire. Les associations étaient additives (lupin 100% + triticale 30% des densités conseillées en culture pure). Les pratiques n'ont pas été standardisées d'un site à l'autre, ce qui a notamment donné lieu à une diversité de dispositifs de semis et de pratiques de désherbage. Ce réseau a permis de comparer les deux modes de culture dans une gamme de conditions pédoclimatiques, de pratiques agricoles et de potentiel de salissement par les adventices. L'essai factoriel a été réalisé proche d'Angers en mini-parcelles et a permis de comparer les cultures pures et cultures associées lupin-céréales avec deux variétés de lupin blanc d'hiver (Clovis et Magnus), le triticale Vuka et les variétés de blé tendre Valdo et Rubisko, là aussi dans un dispositif additif lupin 100% + céréale 30%, sans fertilisation et sans désherbage. Concernant l'association lentille-blé tendre de printemps, un essai factoriel répété deux ans avec 4 variétés de lentille (Anicia, Beluga, Flora et Rosana) et 2 de blé tendre de printemps (Togano, Valbona) a été réalisé à l'INRA-Auzeville. Les densités des cultures pures étaient de 300 grains $m^{-2}$ et 450 grains $m^{-2}$ pour la lentille et le blé respectivement. Des dispositifs de type additifs avec la lentille comme culture principale (densité de lentille 100% + blé 17% ou 33%) et substitutifs (densité de lentille 67% + blé 33% et lentille 50% + blé 50%) ont été testées. Les dispositifs additifs ont été testés pour chaque couple, constitué d'une variété de lentille et d'une variété de blé. Seulement quelques couples ont été testés pour les dispositifs substitutifs car nous avions fait l'hypothèse que ces derniers ne favorisaient pas la production de lentille en association.

Ces essais ont été complétés par des observations en parcelles d'agriculteurs de la Coopérative Qualisol en agriculture biologique (Projet LEGITIMES[2] ; Gers et Tarn-et-Garonne). Les parcelles en association étaient semées selon un dispositif additif (lentille 100% + 17-33% de blé) et sur chacune le mélange a été comparé avec une zone de lentille pure, semée au sein de la parcelle.

Les performances des associations ont été comparées à celles des légumineuses pures, en vue de qualifier et quantifier les services apportés par la céréale. Des mesures de rendement, de composantes du rendement, d'acquisition d'azote et d'interception de la lumière ont été réalisées en dynamique afin de comprendre les interactions entre espèces.

[1] Projet PROGRAILIVE, 2017. https://www.vegepolys.eu/les-projets-innovants/les-projets-precompetitifs/les-projets-en-cours/sos-protein/prograilive/

[2] Projet LEGITIMES, 2017. Construction et évaluation de scénarios territoriaux d'insertion de légumineuses. www6.inra.fr/legitimes

## 2. Résultats et discussion

### *2.1 Performances de production des associations*

Nos travaux ont montré que le rendement en grain total des associations additives était plus élevé que celui des légumineuses pures, en moyenne de 51% pour la lentille et de 34% pour le lupin (Figure 1). Dans les associations additives lentille-blé, le rendement de la lentille était négativement corrélé avec la densité du blé associé indiquant la forte compétition de la céréale sur cette légumineuse. Pour les deux légumineuses, l'ajout d'une faible quantité de céréale, entre 17% et 30% de la densité recommandée en culture pure, a induit une réduction significative du rendement de la légumineuse (-15% et -22% pour la lentille et le lupin respectivement, Figure 1). Les associations substitutives n'ayant pas montré des résultats intéressants pour la production de légumineuses, ceux-ci ne seront pas présentés dans cet article. Néanmoins, ces résultats suggèrent que la densité de la légumineuse en association doit être égale à celle en culture pure pour maximiser leur rendement car la compétition du blé est forte.

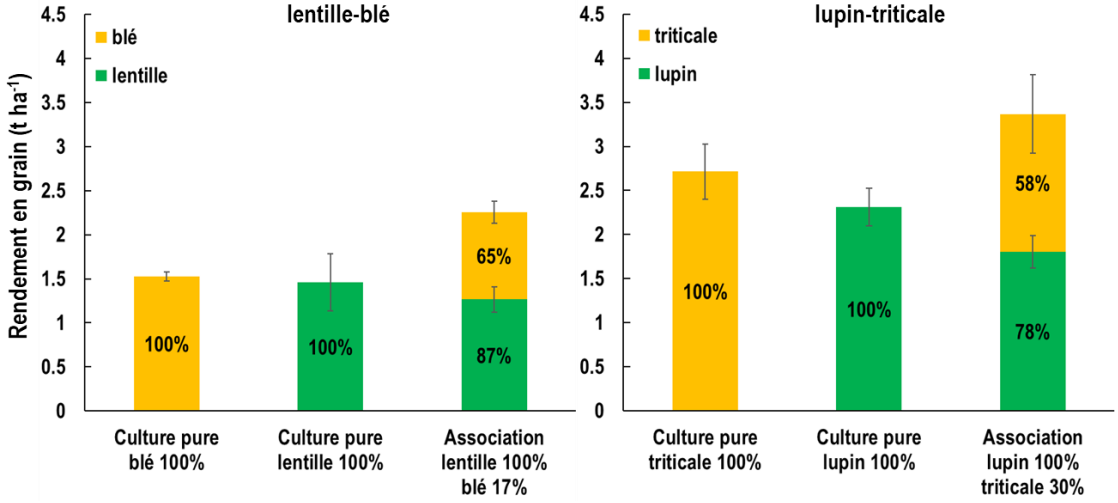



**Figure 1** : Rendement des cultures pures et des associations additives estimé par récolte manuelle de lentille et de blé (à gauche ; 1.98 m² par micro-parcelle) et de lupin et triticale (à droite, 1.05 m² par micro-parcelle) dans les essais en station. Les pourcentages inscrits dans les barres d'histogramme indiquent le rendement relatif par référence au rendement de culture pure de la même espèce.

Sur les quatre variétés de lentille testées en station, trois (Anicia, Flora et Rosana) avaient un rendement en culture pure similaire (1.82±0.08 t ha$^{-1}$), et une variété (Beluga) avait un rendement inférieur (0.98 t ha$^{-1}$). Néanmoins, la variété la moins productive est celle dont la réduction de rendement en association est la plus faible (-21%) contre -37±2% pour les autres. Aucun effet de la variété de blé n'a été observé sur le rendement des lentilles et réciproquement aucun effet de la variété de lentille n'a été observé sur le rendement du blé. Dans le cas du lupin, nous avons montré que le triticale était plus compétitif que le blé avec une perte moyenne de rendement du lupin de 8% avec le blé et de 22% avec le triticale. Nous avons observé que la variété de lupin la plus haute (Magnus) est celle dont le rendement est le moins réduit en association (- 9%) contre -21% pour la variété la plus basse (Clovis).

Enfin, nos essais ont mis en évidence des interactions de type génotype × environnement × conduite qui rendent délicates la prédiction des performances agronomiques des associations sur la base uniquement des variétés, espèces et densités considérées, indiquant la nécessité de travaux complémentaires pour pouvoir prédire ces effets.

### *2.2 Amélioration du taux de protéines des céréales et rendement total en protéines*

Le taux de protéines du blé en association était en moyenne supérieur à celui du blé pur (13% vs 12% respectivement). Dans le cas du triticale associé au lupin le taux de protéines de la céréale n'a été significativement augmenté que dans les situations où son rendement était fortement réduit (divisé par deux) en association (9% contre 7%). Chez le lupin, dans le réseau de parcelles, dans 8 cas sur 11, les associations ont produit par hectare autant de protéines dans les grains que le lupin pur, dans les trois autres cas, le rendement du lupin a été trop réduit pour maintenir la production totale de protéines. Enfin, les taux de protéines des légumineuses en association n'ont globalement pas été modifiés par rapport aux cultures pures.

Le gain qualitatif observé sur les céréales s'explique par le fait que la légumineuse utilise principalement l'azote de l'air si bien que la majorité de l'azote minéral du sol est disponible pour la céréale dont le nombre de plantes par m² est faible et le rendement en grain par ailleurs limité par la compétition de la légumineuse (Gooding *et al.*, 2007). Par conséquent, la céréale en association bénéficie d'une plus grande disponibilité en azote par plante et grain de céréale produit. L'association est donc un mode de culture qui permet d'améliorer la teneur en protéines des céréales, comme déjà montré pour d'autres associations céréale-légumineuse (ex. Bedoussac et al., 2015). Il s'agit d'un avantage important pour les associations car obtenir des taux de protéines élevés pour les céréales en culture pure en agriculture biologique et en système à bas niveau d'azote est particulièrement difficile, et ce même avec une fertilisation organique.

### *2.3 Acquisition des ressources (lumière et azote) par les associations*

#### 2.3.1 Acquisition de la lumière

Les cycles de la lentille et du blé de printemps s'étendent de début mars à mi-juillet. Le blé présente un port érigé à développement relativement rapide et la lentille un port semi-érigé à développement relativement lent. En début de phase végétative, le taux de couverture du blé pur est plus élevé que celui de la lentille, mais ensuite le taux de couverture maximal du blé est très inférieur à celui de la lentille (≈40% *vs* ≈85% ; Figure 2), ce qui s'explique en premier lieu par nos conditions de faible disponibilité en azote. La lentille atteint son taux de couverture maximal au moment de sa floraison soit environ 200 degrés jour après celui du blé (Figure 2). Le taux de couverture de l'association est sur l'ensemble du cycle supérieur au taux de couverture moyen des cultures pures car elle cumule les avantages du développement précoce du blé puis du développement tardif de la lentille (Figure 2).

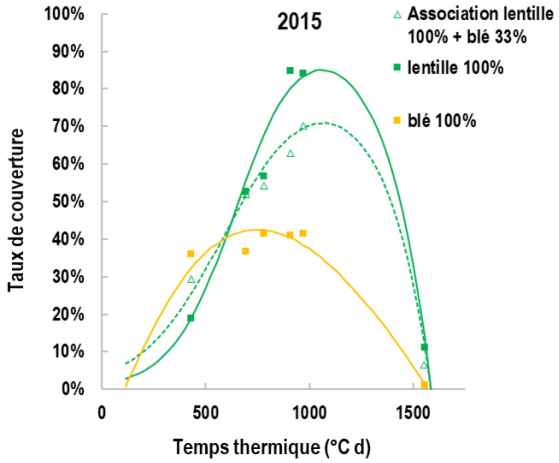



**Figure 1** : Taux de couverture de l'association lentille-blé en additif (lentille Anicia 100% + blé Valbona 33%) et des cultures pures respectives en fonction du temps thermique.

L'acquisition du Rayonnement Photosynthétiquement Actif (PAR), correspondant à la fraction du rayonnement utilisable par les plantes pour la photosynthèse, est un facteur majeur de leur productivité. A l'instar du taux de couverture, l'acquisition de PAR par l'association est supérieure à la moyenne des cultures en raison de complémentarités de croissance dans le temps et dans l'espace des deux espèces. Cette complémentarité entre espèces explique en partie le gain de rendement global observé dans les associations. Toutefois, la compétition du blé sur la lentille pour l'acquisition des ressources (lumière, eau, minéraux) tend à réduire la production de biomasse de la lentille en association par rapport à sa culture pure, et donc son rendement en grain.

Le cycle de culture du lupin blanc d'hiver est nettement plus long et s'étend de fin septembre à début août. La faible biomasse, la faible densité et les forts écartements inter-rangs du lupin pur (30 à 60 cm) conduisent à une faible couverture du sol en début de cycle par rapport aux céréales et à l'association, qui sont semées à 15-20 cm d'inter-rang. Dans le cas des associations lupin-céréale, la complémentarité temporelle pour l'acquisition de la lumière est très marquée. Des mesures du taux de couverture ont montré que l'ajout d'une céréale multipliait par quatre la couverture du sol en hiver. La fermeture du couvert de lupin pur est seulement effective à partir de la croissance des ramifications, qui intervient début mai (près de 8 mois après le semis) au moment de la pleine floraison. L'ajout d'une céréale a permis d'avancer d'un à trois mois la fermeture du couvert, améliorant l'acquisition de la lumière par le couvert associé. De plus, dans l'association, l'architecture ramifiée du lupin offre une bonne couverture du sol lorsque la senescence de la céréale démarre et que sa surface foliaire décroit.

### 2.3.2 Acquisition de l'azote

Nos résultats ont montré que le lupin était beaucoup moins compétitif que les céréales pour l'acquisition de l'azote du sol. En sortie d'hiver, dans l'essai en station conduit en 2016, une plante de lupin dans la culture pure avait prélevé 11 mg d'azote minéral contre 77 mg pour une plante de céréale associée (Figure 3). Ces résultats ont été confirmés dans des expérimentations en rhizotrons qui ont également permis de décrire les caractéristiques des espèces qui permettent ce fort contraste, notamment liées aux systèmes racinaires. Le triticale a montré une longueur totale racinaire par plante huit fois plus importante que le lupin blanc d'hiver après un mois de culture en serre (Carton *et al.*, 2017). Comme la densité de peuplement des céréales est aussi deux à trois fois plus élevée que celle du lupin, cela permet de multiplier par dix les racines qui déterminent le prélèvement d'azote minéral du sol par rapport à la culture pure de lupin en début de cycle. Il est intéressant de noter que le triticale associé, semé à seulement 30% de la densité normale, a permis d'acquérir en moyenne 67% de l'azote acquis par le triticale pur (Figure 5). Bien que les écarts entre lupin et céréales pour les prélèvements d'azote du sol se réduisent plus tard dans le cycle, ils restent importants et cela se traduit par une quantité d'azote disponible pour les adventices moindre en association par rapport à la légumineuse pure.

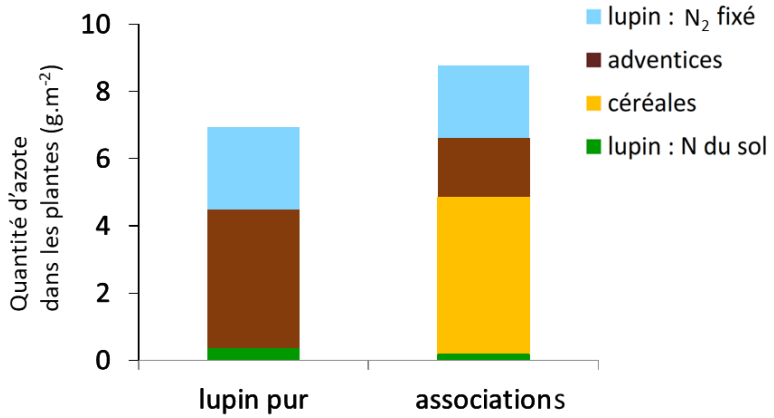



**Figure 2** : Quantité d'azote acquise par le lupin, les adventices et les céréales, dans le lupin pur et les associations lupin-triticale et lupin-blé, en sortie d'hiver, dans l'expérimentation en station en 2016.

Chez la lentille, la quantité d'azote minéral acquise sur l'ensemble du cycle est similaire entre l'association et les cultures pures de lentille et de blé dans un contexte de faible disponibilité (30 kg N $ha^{-1}$ au semis sur 0-120 cm et sans apport d'engrais). Le blé a prélevé en moyenne 75% de l'azote minéral acquis par l'association, ce qui indique, comme énoncé précédemment, une meilleure compétitivité du blé pour cette ressource. En conséquence, la lentille doit compenser cette moindre disponibilité en azote par un accroissement de son activité fixatrice en association pour satisfaire ses besoins en azote. Ainsi, le taux de fixation est supérieur en association (84±2% contre 70±6% en culture pure) et des résultats comparables ont été obtenus avec le lupin. Par ailleurs, nous avons montré, grâce à des mesures non destructives au moyen d'un dispositif de mini-rhizotrons installés au champ, que les racines du blé se développaient plus rapidement et plus profondément que celles de la lentille. Cela permettrait au blé d'avoir accès à un pool de ressources (dont l'azote minéral et l'eau) plus important que la lentille, aussi bien en culture pure qu'en association. Du fait de la complémentarité biogéochimique (parfois appelée complémentarité de niche) entre espèces pour l'utilisation des deux sources d'azote (minéral et air) et du taux de fixation plus élevé de la lentille, la quantité d'azote totale acquise par l'association est supérieure à la moyenne des cultures pures (110 *vs.* 94 kg N $ha^{-1}$).

Les deux associations étudiées montrent des **complémentarités** spatiales et temporelles pour l'acquisition de lumière ainsi que spatiales, temporelles et biogéochimiques pour l'acquisition de l'azote. Ces complémentarités expliquent en grande partie les rendements des associations supérieurs à ceux des cultures pures. Le meilleur contrôle des adventices, qui disposent de moins de ressources pour se développer dans les associations, participe également à l'effet favorable sur le rendement.

### *2.4 Effet des associations sur les adventices, bruches et verse*

Dans les deux types d'associations l'ajout d'une faible quantité de céréale (17% de la densité recommandée en culture pure avec la lentille et 30% avec le lupin), a permis de diminuer très significativement la biomasse des adventices (Figure 4) par rapport aux cultures pures de légumineuses (-44% en moyenne pour la lentille et -72% pour le lupin). Dans le cas du lupin, la réduction de la biomasse des adventices permise par l'addition du triticale s'est exprimée malgré un Indice de Fréquence de Traitement Herbicide (IFT H) plus élevé dans le lupin pur.

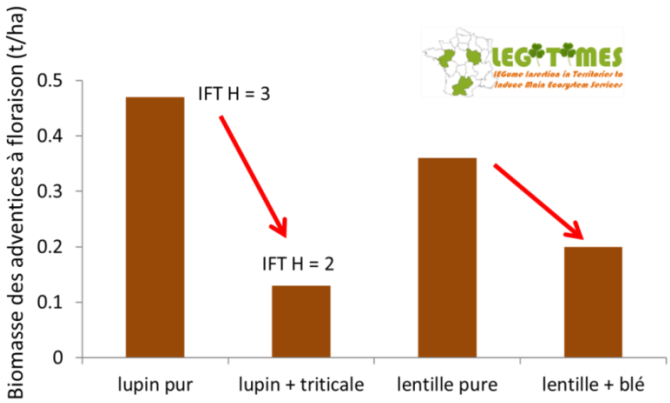



**Figure 4** : Biomasse des adventices dans le réseau de parcelles de comparaison pour le lupin, le lupin-triticale, la lentille et la lentille-blé (données issues du Projet LEGITIMES, 2017).

Dans le cas du lupin, nous avons montré que la réduction de la biomasse des adventices permise par l'association était étroitement liée à la disponibilité en azote (Figure 5). En effet, la quantité d'azote minéral disponible pour les adventices dans une parcelle avec association est réduite en raison des prélèvements importants et précoces des céréales dès la sortie d'hiver, alors qu'à cette période, le lupin pur n'a prélevé que très peu d'azote minéral.

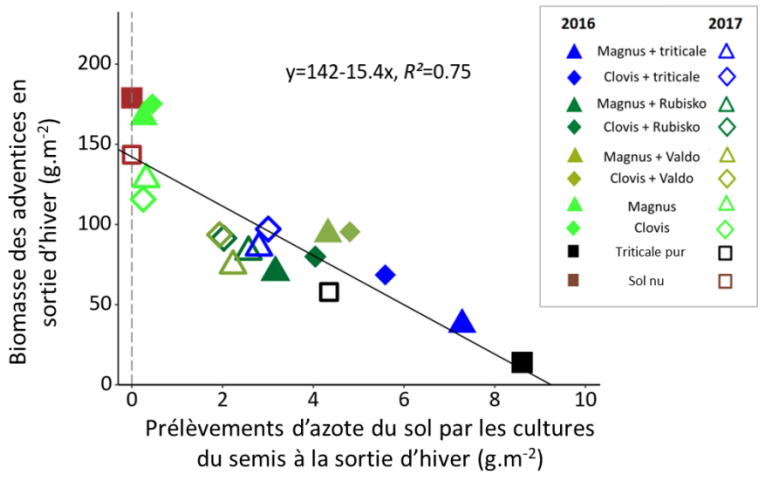



**Figure 5** : Corrélation entre les prélèvements d'azote du sol par les cultures (lupin pur, triticale pur, associations lupin-triticale et lupin-blé) et la biomasse des adventices, en sortie d'hiver, dans l'essai en station. Magnus et Clovis sont deux variétés de lupin, Rubisko et Valdo sont deux variétés de blé.

Dans les associations blé-lentille, la présence du blé n'a pas eu d'effet sur le taux de bruchage des lentilles (42% vs 40% en moyenne pour les lentilles associées et pures respectivement). Cependant, les essais n'étant pas conçus pour l'étude de ce ravageur (petites parcelles), ces conclusions doivent être vérifiées en condition de grandes parcelles agricoles. Par ailleurs, nos résultats suggèrent que la pression des bruches dépend des années et des variétés de lentille, ce qui doit là encore être analysé plus largement.

Toujours dans les associations blé-lentille, nous avons observé une diminution significative de la verse de la lentille avec pour conséquence une hauteur de la gousse la plus basse plus élevée en association qu'en culture pure (Viguier *et al.,* 2018). Ce phénomène a permis une meilleure efficacité de récolte mécanique de la lentille en association (75% contre 50% en culture pure). Ainsi, alors que le rendement de lentille « sur pied » est significativement réduit en association on obtient *in fine*, après une récolte mécanique, un rendement comparable de lentille en association et en culture pure (Figure 6 ; Viguier *et al.,* 2018).

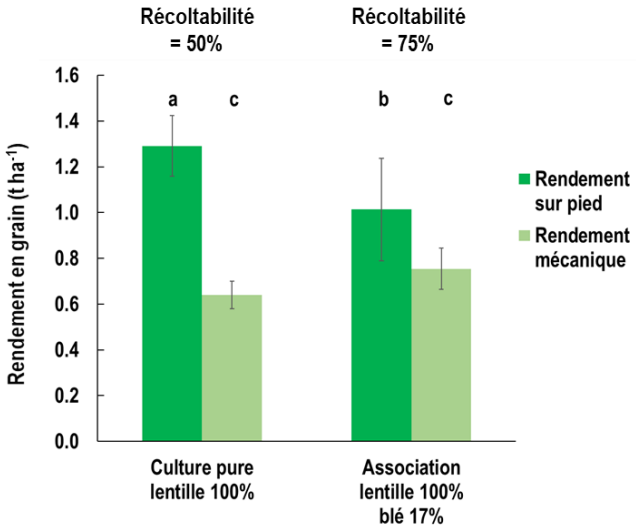



**Figure 6** : Rendement de la lentille sur pied et après une récolte mécanique montrant l'efficacité de récolte de la lentille cv. Anicia en fonction du mode de culture : Lentille Anicia pure et association avec la variété de blé Valbona.

### *2.5 Performance économique*

Les travaux menés sur lentille-blé ont montré que les pertes en grain au moment de la récolte mécanique étaient très élevées (Figure 5) et devaient être prises en compte pour évaluer la performance économique (Viguier *et al*., 2018) et ce d'autant plus que le prix de vente de la lentille est environ 4 fois plus élevé que celui du blé. De même il est nécessaire de prendre en compte les grains qui sont impropres à la consommation humaine et qui sont écartés lors du nettoyage des lots (grains cassés et grains bruchés). Cela nous conduit à calculer une marge brute, considérant le « rendement commercialisable », qui est nettement plus élevée en association par rapport aux lentilles pures (949 vs 688 € $t^{-1}$ respectivement ; Viguier *et al.,* 2018) et ce quel que soit le niveau de rendement des lentilles pures.

Pour le lupin, une évaluation technico-économique réalisée dans le cadre du projet PROGRAILIVE sur deux sites du réseau de parcelles a montré que, dans un contexte de fort salissement, l'association permettait d'obtenir une marge équivalente à la culture pure de lupin. En revanche, dans une situation où le lupin pur a une forte productivité (climat favorable, pas d'excès d'eau dans le sol et facteurs limitants biotiques contrôlés), l'ajout d'une céréale réduit fortement le rendement du lupin et donc le rendement en protéines et *in fine* la performance économique (Hubert, 2017).

## 3. Conclusions principales et recommandations

Ces deux travaux de thèse renforcent la généricité des conclusions obtenues pour ces 2 associations de céréale et de légumineuse, indiquant la robustesse des performances mesurées pour ces associations lentille-blé et lupin-céréales. Ces résultats viennent soutenir l'occurrence d'une généricité dans le fonctionnement des associations légumineuses-céréales à travers les interactions inter-spécifiques et les processus de compétition et de complémentarité qui se produisent dans ces peuplements bi-spécifiques. C'est en forte cohérence avec une littérature scientifique désormais fournie sur le sujet, laquelle ne comptait pas encore d'information sur les deux types d'association testées ici. Nos travaux permettent donc de renforcer les hypothèses émises sur les associations d'espèces annuelles pour la production de graines.

Dans les deux cas, les associations ont quasiment toujours permis d'augmenter les rendements totaux par rapport aux cultures pures. Nos travaux ont montré que la meilleure performance des associations était principalement liée à une meilleure acquisition des ressources : i) énergie solaire à travers des complémentarités spatiales (racinaire et aérienne) et temporelles (cycle de développement) et ii) azote à travers une complémentarité de niche pour l'acquisition de l'azote minéral du sol et du diazote de l'air par la fixation symbiotique, ce qui confirme les résultats d'études précédentes (*e.g.* Bedoussac *et al.*, 2015 ; Corre-Hellou *et al.*, 2011).

Associer une céréale à une légumineuse a permis de limiter fortement la biomasse des adventices, qui sont l'un des verrous agronomiques principaux du lupin et de la lentille. Dans le cas de la lentille, l'effet « tuteur » du blé a conduit à une forte diminution de la verse qui est également un frein majeur qui diminue fortement la part « récoltable » des graines avec les moissonneuses-batteuses. L'association a, dans la plupart des cas pour le lupin et quasi systématiquement pour la lentille, permis d'améliorer le taux de protéines de la céréale, ce qui est particulièrement intéressant pour produire du blé panifiable en agriculture biologique dont la valeur marchande est ainsi nettement plus élevée et donc très favorable à l'adoption de cette pratique par les agriculteurs et les acteurs de la filière.

Ainsi, les analyses économiques ont montré une meilleure performance des associations par rapport aux cultures pures, notamment pour la lentille en agriculture biologique. L'association légumineuse-céréale semble donc être une pratique pertinente pour le développement des légumineuses en France et en Europe et notamment pour les systèmes à bas niveau d'intrants. C'est donc une voie à développer pour la transition agroécologique de l'agriculture.

La variabilité entre sites, les différences entre années et entre modalités ont permis d'identifier des conditions favorables à l'expression des performances des associations, c'est-à-dire des situations où la production de la légumineuse a pu être maintenue tout en obtenant une production complémentaire de céréale. La performance des associations reste néanmoins la résultante d'interactions complexes entre les espèces qui dépendent des génotypes, de l'environnement et de la conduite. Des études approfondies de ces interactions par des approches de modélisation pourraient permettre de mieux comprendre et prédire ces interactions, et *in fine* de concevoir des itinéraires techniques plus performants. Malgré tout, sur la base de ces observations, nous pouvons suggérer quelques combinaisons de pratiques notamment pour le choix d'espèces et de densités de semis.

### *3.1 Choix des espèces et variétés pour l'association lupin et céréale*

Nous conseillons d'adapter le choix des variétés et de l'espèce associée en fonction : i) du risque de salissement de la parcelle et ii) de la disponibilité potentielle en azote minéral. Afin d'exercer une forte compétitivité précoce sur les adventices, la céréale doit présenter une forte croissance précoce en lien avec une forte compétitivité pour l'azote et un port étalé avant la montaison. L'objectif est d'accroitre la biomasse précoce de l'association sans pour autant réduire trop fortement la croissance de la légumineuse. Par exemple, pour l'association avec le lupin, la céréale ne doit pas représenter plus des deux tiers de la biomasse de l'association à la floraison de la légumineuse, qui va quant à elle avoir une croissance importance après la phase de forte croissance de la céréale (Carton, 2017). En ce qui concerne le choix de la variété de lupin on privilégiera une variété haute qui sera a priori moins impactée par la compétition de la céréale pour l'acquisition de la lumière dans les stades précoces.

### *3.2 Densités de semis*

La lentille doit être associée à une faible densité de céréale pour limiter la compétition sur la légumineuse mais cette densité doit être suffisante pour réduire la verse de la lentille et limiter le développement des adventices. Nos essais ont montré que la densité de blé ne devait pas excéder 20% de la densité normale pour atteindre ces objectifs ; même si cette proportion est à affiner éventuellement en fonction des conditions de production, compte tenu de ce qui nous avons compris du fonctionnement de ces associations, cette valeur paraît le bon ordre de grandeur à retenir pour l'action. Réduire encore cette densité risquerait de ne pas permettre de lutter efficacement contre les adventices ni de réduire la verse de la lentille. La lentille doit être semée à la même densité qu'en culture pure.

En association lupin-triticale, pour assurer un rendement minimum de 15 q/ha de lupin, il est essentiel de sécuriser une densité minimale de lupin de l'ordre de 20-25 plantes/m$^2$ en sortie d'hiver pour limiter la compétitivité de la céréale notamment les années à automne et hiver doux favorables au triticale (Carton, 2017). Nous recommandons donc de tester le semis du lupin à 115% de sa densité normale et le triticale à 20%.

### *3.3 Perspectives de recherches*

La question de l'intégration des cultures associées dans les rotations a été peu traitée et doit être menée notamment dans une approche de diversification des systèmes de culture combinant des cultures pures et des cultures associées à la fois en interculture et pour la vente. Ces questions font l'objet de recherches à l'INRA de Toulouse depuis 2010 ainsi que dans le cadre du projet Européen H2020 DiverIMPACTS (www.diverimpacts.net/)

La sélection de variétés pour la conduite en association est également une piste en cours de développement qui pourrait permettre d'améliorer les performances des associations. En effet, les variétés les plus performantes en culture associée ne sont pas nécessairement les plus performantes

en culture pure car les compétitions interspécifiques peuvent s'avérer différentes en fonctions des traits phénologiques et physiologiques des variétés, ce qui nécessite de repenser les critères et les schémas de sélection. Cette question est analysée dans le projet européen H2020 ReMIX (https://www.remix-intercrops.eu). La sélection de variétés de légumineuses à graines dont les performances sont plus stables face aux facteurs abiotiques est également identifiée comme un besoin, les cultures associées permettant principalement de lever des verrous agronomiques liés à des facteurs abiotiques (ressources en eau, C, N, P…).

En termes de performances, les cultures associées ont montré leur intérêt pour accroître la teneur en protéines des céréales et des travaux sont actuellement menés pour évaluer leur effet sur d'autres critères qualitatifs et nutritionnels notamment vis-à-vis de la teneur en minéraux (N, P, K, Fe, Ca, Mg, Zn).

Enfin, des innovations dans le machinisme pour le semis, la récolte et le tri des associations pourraient faciliter leur développement et des travaux sont actuellement conduits en partenariat avec des entreprises spécialisées, pour voir les marges de progrès possibles, dans le projet Européen H2020 ReMIX.

**Références bibliographiques**

Angus J.F., Kirkegaard J.A., Hunt J.R., Ryan M.H., Ohlander L., Peoples M.B., 2015. Break crops and rotations for wheat. Crop Pasture Sci 66, 523-552.

Bedoussac L., Journet E.-P., Hauggaard-Nielsen H., Naudin C., Corre-Hellou G., Jensen E.S., Prieur L., Justes E., 2015. Ecological principles underlying the increase of productivity achieved by cereal-grain legume intercrops in organic farming. A review. Agron. Sustain. Dev. 35(3), 911-935.

Car P.M., Gardner J.J., Schatz B.G., Zwinger S.W., Guldan S.J., 1995. Grain yield and weed biomass of a wheat-lentil intercrop. Agronomy Journal 87(3), 574-579.

Carton N., 2017. Interactions induites par l'association du lupin avec une céréale, effets sur les adventices et conséquences sur la productivité, Thèse de doctorat, Université d'Angers, France, 207 p.

Carton N., Naudin C., Piva G., Baccar R., Corre-Hellou G., 2018. Differences for traits associated with early N acquisition in a grain legume and early complementarity in grain legume–triticale mixtures. AoB Plants 10(1), ply001.

Cernay C., Ben-Ari T., Pelzer E., Meynard J.-M., Makowski D., 2015. Estimating variability in grain legume yields across Europe and the Americas. Scientific reports 5, 11171.

Corre-Hellou G., Bédoussac L., Bousseau D., Chaigne G., Chataigner C., Celette F., Cohan J.P., Coutard J.P., Emile J.C., Floriot M., Foissy D., Guibert S., Hemptinne J.L., Le Breton M., Lecompte C., Marceau C., Mazoué F., Mérot E., Métivier T., Morand P., Naudin C., et al., 2013. Associations céréale-légumineuse multi-services. Innovations agronomiques 30, 41-57.

Corre-Hellou G., Dibet A., Hauggaard-Nielsen H., Crozat Y., Gooding M., Ambus P., Dahlmann C., von Fragstein P., Pristeri A., Monti M., Jensen E.S., 2011. The competitive ability of pea-barley intercrops against weeds and the interactions with crop productivity and soil N availability. Field Crops Research 122, 264-272.

European Parliament, 2018. Texts Adopted: A European strategy for the promotion of protein crops. 1–11. http://www.europarl.europa.eu/sides/getDoc.do?type=TA&reference=P8-TA-2018-0095&language=EN

FAO, 2018. FAOSTAT. In Statistical database of the United Nations Food and Agriculture Organization, Rome.

Gooding M.-J., Kasyanova E., Ruske R., Hauggaard-Nielsen H., Jensen E.-S., Dahlmann C., von Fragstein P., Dibet A., Corre-Hellou G., Crozat Y., et al., 2007. Intercropping with pulses to concentrate nitrogen and sulphur in wheat. Journal of Agricultural Science 145(5), 469-479.

Hauggaard-Nielsen H., Gooding M., Ambus P., Corre-Hellou G., Crozat Y., Dahlmann C., Dibet A., von Fragstein P., Pristeri A., Monti M., Jensen E.S., 2009. Pea–barley intercropping for efficient symbiotic

N2-fixation, soil N acquisition and use of other nutrients in European organic cropping systems. Field Crops Research 113(1), 64-71.

Hubert C., 2017. Evaluation des performances technico-économiques des protéagineux grains cultivés en association pour l'alimentation animale. Thèse de Master, Agrocampus Ouest, Rennes, Fr., 74p.

Jensen E.S., 1996. Grain yield, symbiotic N2 fixation and interspecific competition for inorganic N in pea-barley intercrops. Plant and Soil 182, 25-38.

Lemerle D., Verbeek B., Coombes N., 1995. Losses in grain yield of winter crops from Lolium rigidum competition depend on crop species, cultivar and season. Weed Research 35(6), 503-509.

Liebman M., Dyck E., 1993. Crop rotation and intercropping strategies for weed management. Ecological Applications 3(1), 92-122.

Lutman P.J.W., Dixon F.L., Risiott R., 1994. The response of four spring-sown combinable arable crops to weed competition. Weed Research 34(2), 137-146.

Magrini M.-B., Anton M., Cholez C., Corre-Hellou G., Duc G., Jeuffroy M.-H., Meynard J.-M., Pelzer E., Voisin A.-S., Walrand S., 2016. Why are grain-legumes rarely present in cropping systems despite their environmental and nutritional benefits? Analyzing lock-in in the French agrifood system. Ecological Economics 126, 152-162.

Peoples M.B., Brockwell J., Herridge D.F., Rochester I.J., Alves B.J.R., Urquiaga S., Boddey R.M., Dakora F.D., Bhattarai S., Maskey S.L., et al., 2009. The contributions of nitrogen fixing crop legumes to the productivity of agricultural systems. Symbiosis 48, 1-17.

Preissel S., Reckling M., Schläfke N., Zander P., 2015. Magnitude and farm-economic value of grain legume pre-crop benefits in Europe: A review. Field Crops Research 175, 64-79.

Raseduzzaman M., Jensen E.S., 2017. Does intercropping enhance yield stability in arable crop production? A meta-analysis. European Journal of Agronomy 91, 25-33.

Reckling M., Döring T., Stein-Bachinger K., Bloch R., Bachinger J., 2015. Yield stability of grain legumes in an organically managed monitoring experiment. Aspects of Applied Biology 128, 57-62.

Schreuder R., De Visser C., 2014. EIP AGRI focus group protein crops: final report. (Ed European Innovation partnership for Agricultural Productivity and Sustainability). Brussels, Belgium.

Viguier L., 2018. Analysis of the agronomic and economic performances of lentil-spring wheat intercrops in organic farming. Thèse de doctorat, Université de Toulouse, France, 123 p.

Viguier L., Bedoussac L., Journet E.-P., Justes E., 2018. Yield gap analysis extended to marketable grain reveals the profitability of organic lentil-spring wheat intercrops. Agronomy for sustainable development 38(4), 39.

Voisin A.-S., Guéguen J., Huyghe C., Jeuffroy M.-H., Magrini M.-B., Meynard J.-M., Mougel C., Pellerin S., Pelzer E., 2014. Legumes for feed, food, biomaterials and bioenergy in Europe: a review. Agronomy for sustainable development 34(2), 361-380.

Watson C.A., Reckling M., Preissel S., Bachinger J., Bergkvist G., Kuhlman T., Lindström K., Nemecek T., Topp C.F.E., Vanhatalo A., Zander P., Murphy-Bokern D., Stoddard F.L., 2017. Grain legume production and use in European agricultural systems. Adv in Agron 144, 235-303.

Willey R.,1979. Intercropping - its importance and research needs: Part 1. Competition and yield advantages. Field Crop Abstracts, Vol. 32, 1-10.

Zander P., Amjath-Babu T.S., Preissel S., Reckling M., Bues A., Schläfke N., Kuhlman T., Bachinger J., Uthes S., Stoddard F., Murphy-Bokern D., Watson C., 2016. Grain legume decline and potential recovery in European agriculture: a review. Agronomy for sustainable development 36(2), 1-20

Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY-NC-ND 3.0).



https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/fr/

Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue « Innovations Agronomiques », la date de sa publication, et son URL ou DOI).