

## FAVORISER LA PRODUCTION DE LÉGUMINEUSES A GRAINES EN Y ASSOCIANT UNE CEREALE : CAS DE LA LENTILLE ET DU LUPIN BLANC D'HIVER

Nicolas CARTON<sup>1,2\*</sup>, Loïc VIGUIER<sup>3,4</sup>, Laurent BEDOUSSAC<sup>5</sup>, Etienne-Pascal JOURNET<sup>3,6</sup>, Christophe NAUDIN<sup>1</sup>, Guillaume PIVA<sup>1</sup>, Guénaëlle CORRE-HELLOU<sup>1</sup>, Eric JUSTES<sup>3,7</sup>

<sup>1</sup> USC LEVA, INRA, Ecole Supérieure d'Agricultures, Univ. Bretagne Loire, SFR 4207 QUASAV, 55 Rue Rabelais, 49000 Angers, France

<sup>2</sup> Adresse actuelle : Department of Biosystems and Technology, Swedish University of Agricultural Sciences, Sundsvägen 14, 230 53 Alnarp, Suède

<sup>3</sup> AGIR, Université de Toulouse, INRA, Castanet-Tolosan, France

<sup>4</sup> Qualisol, 851 chemin de Carrel, BP 67, 82102 Castelsarrasin Cedex, France

<sup>5</sup> AGIR, Université de Toulouse, INRA, ENSFEA, Castanet-Tolosan, France

<sup>6</sup> LIPM, Université de Toulouse, INRA, CNRS, Castanet-Tolosan, France

<sup>7</sup> Adresse actuelle : CIRAD, UMR SYSTEM, Univ Montpellier, CIHEAM-IAMM, CIRAD, INRA, Montpellier SupAgro, Montpellier, France

\* Auteur de correspondance : Nicolas CARTON, [nicolas.carton@slu.se](mailto:nicolas.carton@slu.se),

**Mots-clés** : association de cultures, adventices, compétition, complémentarité, efficacité économique

### Introduction

#### **Jeux des légumineuses à graines en Europe**

L'Europe importe une grande partie de ses besoins en protéines végétales destinées à l'alimentation humaine ou animale. Par exemple, la dépendance aux importations est 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). Les légumineuses à graines sont peu cultivées en Europe et ne représentaient, en 2014, que 1.5% de la surface arable européenne. Cela explique la mise en œuvre d'une politique agricole commune d'incitation à la production de légumineuses à graines (légumes secs et protéagineux) au niveau européen pour réduire le déficit en protéines végétales.

Les légumineuses à graines présentent de nombreux avantages nutritionnels et environnementaux. Une plus grande intégration de ces cultures dans les systèmes agricoles permettrait de réduire la dépendance au soja importé pour l'alimentation animale et d'accompagner la transition vers des régimes alimentaires basés majoritairement sur des produits végétaux produits localement (Röös *et al.*, 2018).

Du point de vue agronomique, l'intégration de légumineuses permet des économies d'azote à l'échelle de la rotation par rapport à des successions majoritairement constituées de céréales du fait de leur capacité à fixer en symbiose le diazote de l'air (Peoples *et al.*, 2009, Preissel *et al.*, 2015). De plus, les légumineuses sont vues comme un levier essentiel pour augmenter la diversité des systèmes de grandes cultures. Un des avantages de cette diversification est de rompre le cycle des pathogènes et ainsi de réduire le recours aux pesticides à l'échelle de la rotation (Peoples *et al.*, 2009; Angus *et al.*, 2015).

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

La faible présence des cultures de légumineuses à graines en Europe s'explique par des niveaux de rendements faibles non compensés par des prix de vente plus élevés. De plus les légumineuses présentent une plus grande variabilité de rendement par rapport aux autres cultures (Cernay *et al.*, 2015 ; Reckling *et al.*, 2015) qui est souvent citée comme un facteur expliquant que les agriculteurs leur préfèrent 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 reçu moins d'investissements notamment en termes de sélection que les cultures majeures, ce qui peut expliquer en

partie la plus forte incidence des verrous agronomiques cités précédemment (Voisin *et al.*, 2014, Magrini *et al.*, 2016). En particulier, les légumineuses à graines sont sensibles à de nombreux facteurs abiotiques (anoxie, stress hydriques et thermiques, verse) et biotiques (ravageurs, maladies cryptogamiques, virus et adventices).

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 verrous. En particulier, ces deux espèces sont particulièrement sensibles à la concurrence des adventices ce qui peut conduire à une perte totale de récolte en situation « bas intrants » et notamment en agriculture biologique (Lutman *et al.*, 1994 ; Lemerle *et al.*, 1995). De plus, la lentille est particulièrement sensible à la bruche, un coléoptère dont les larves se nourrissent des graines, et à la verse qui peut induire de fortes pertes en grains lors de la récolte mécanique (Carr *et al.*, 1995).

Pour autant, la lentille et le lupin ont récemment bénéficié d'un regain d'intérêt de la part des acteurs du monde agricole (chercheurs, coopératives et agriculteurs) en raison du marché existant pour l'alimentation humaine et animale. Il convient donc de trouver des façons de faciliter leur intégration dans les systèmes de culture pour que ceux-ci concilient la fourniture de services écosystémiques et la performance économique. Pour ce faire, il est important de concevoir des itinéraires techniques qui permettent de réduire ou lever les verrous agronomiques de ces légumineuses afin de développer leurs performances agronomique et économique et *in fine* leur production en Europe et en France.

### **Associer les légumineuses à des céréales pour faciliter la production de protéines ?**

Une des solutions pour améliorer les performances des légumineuses à graines est la culture associée, qui correspond à 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 reconnue pour ses capacités multi-services, notamment à : i) augmenter et stabiliser les rendements (Bedoussac *et al.*, 2015 ; Carton, 2017, Raseduzzaman et Jensen, 2017), via les complémentarités pour l'acquisition d'azote (air et sol ; Jensen, 1996 ; Hauggaard-Nielsen *et al.*, 2009 ), ii) réduire le développement des adventices par rapport aux cultures pures de légumineuses (Bedoussac *et al.*, 2015 ; Corre-Hellou *et al.*, 2011; Pelzer *et al.* 2014), et donc iii) accroître les marges brutes en situations à bas niveaux d'intrants et agriculture biologique (Bedoussac *et al.*, 2015).

Lorsque les associations sont cultivées avec comme culture principale le protéagineux, ce dernier est généralement semé à une densité proche de sa densité recommandée en culture pure, et l'espèce associée à une faible densité (15 à 30% de sa densité en culture pure; Corre-Hellou *et al.*, 2013, on peut noter les densités L100% C30% par exemple). Dans ce cas l'espèce associée peut être considérée comme une plante compagne. Cette faible densité de la plante compagne doit permettre de réduire la nuisibilité des bio-agresseurs qui limitent la production du protéagineux en culture pure, 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 et ainsi à accroître le produit brut, notamment lorsque les conditions de l'année sont peu favorables à la production de la légumineuse. L'espèce associée apporterait donc une sécurité dans la production, ce qui serait particulièrement appréciable pour stabiliser la production entre années, notamment en systèmes à bas intrants et en agriculture biologique.

### **Deux thèses pour étudier les performances des associations légumineuse-céréale.**

Deux thèses ont été réalisées entre 2014 et 2018, l'une sur le lupin blanc d'hiver (Nicolas Carton au LEVA, à l'ESA Angers Loire, au sein du projet PROGRILIVE) et l'autre sur la lentille semée au printemps (Loïc Viguière à l'INRA de Toulouse, en partenariat avec la coopérative Qualisol). Ces deux thèses visaient à étudier l'intérêt des cultures associées pour lever certains verrous agronomiques des légumineuses pures : adventices et variabilité du rendement chez le lupin et adventices, bruches et verse chez la lentille pour *in fine* améliorer les performances agronomiques. De plus, ces thèses ont permis de mieux comprendre le fonctionnement des associations pour optimiser les itinéraires techniques.



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. Dans les deux cas, il s'agissait d'étudier des associations où la céréale est semée à faible densité par rapport à sa densité recommandée en culture pure. Concernant l'association lupin blanc d'hiver-céréale, des essais ont été menés en réseau de parcelles (11 sites en région Pays-de-Loire, lupin blanc d'hiver-triticales) et un essai en station d'expérimentation en mini-parcelles ce dernier ayant été répété deux ans (lupin-triticales et lupin-blé proche d'Angers). Concernant l'association lentille-blé de printemps un essai factoriel a été réalisé à l'INRA-Auzeville, complété par des observations en parcelles d'agriculteurs de la Coopérative Qualisol en agriculture biologique (projet LEGITIMES). 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, des composantes du rendement, de l'acquisition de l'azote minéral du sol et de l'interception de la lumière ont été réalisées en dynamique afin de comprendre les mécanismes en jeu dans les interactions entre espèces.

## Résultats et discussion

### Performance agronomique des associations

Nos travaux ont montré que le rendement en grain sur pied (récolte manuelle) total des associations était presque toujours plus élevé que celui des légumineuses pures, en moyenne de 37% pour le lupin et de 43% pour la lentille (Figure 1). Dans les associations lentille-blé, le rendement de la lentille était corrélé négativement avec la densité de blé indiquant la forte compétition du blé sur cette légumineuse (Figure 1). Aussi bien pour le lupin que pour la lentille, l'ajout d'une faible quantité de céréale, entre 17% et 30% de la densité recommandée en culture pure, a suffi pour réduire significativement le rendement de la légumineuse (-30% et -13% pour le lupin et la lentille respectivement, Figure 1).

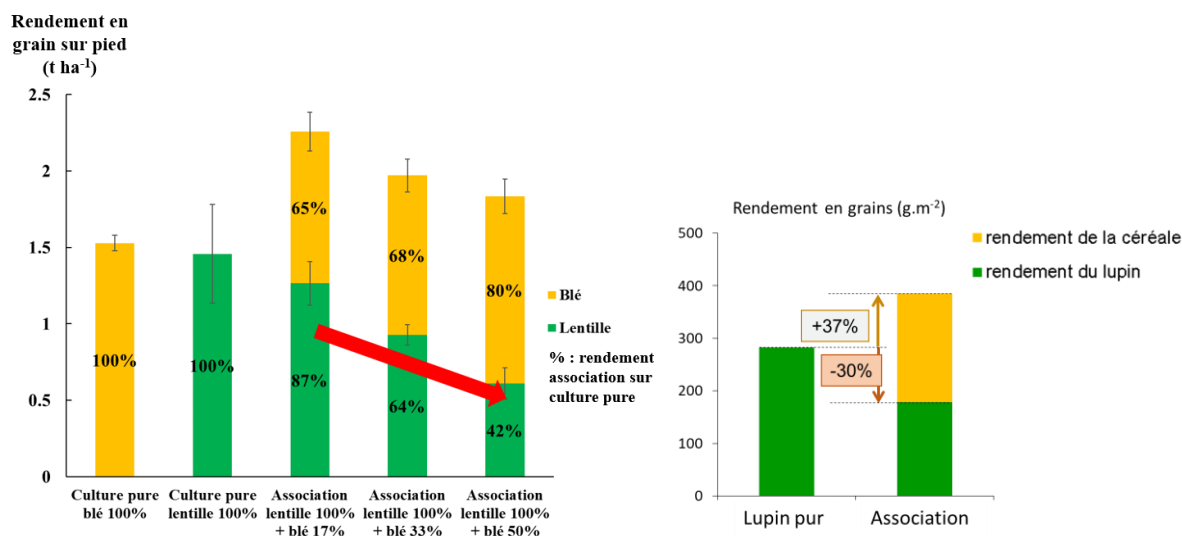


Figure 1: rendement sur pied des cultures pures et des associations de lentille et de blé à la station l'INRA-Auzeville (gauche) et rendement sur pied du lupin pur et de l'association lupin-triticales dans le réseau de 12 sites (droite)

Au sein des associations lupin-céréale et lentille-blé, différentes combinaisons ont été évaluées. Sur les quatre variétés de lentille testées, 3 avaient un rendement sur pied en culture pure similaire ( $1.82 \pm 0.08$  t ha⁻¹), et la dernière un rendement inférieur ( $0.98$  t ha⁻¹). Néanmoins, la variété la moins productive des quatre était celle dont l'écart entre rendement sur pied en association et en culture pure était le plus faible, -24% vs  $-42 \pm 1\%$ ). Aucun effet de la variété de blé n'a été observé sur le rendement des lentilles, ni d'effet de la variété de lentille sur le rendement du blé. Dans le cas du lupin, nous avons montré que le triticales était plus compétitif sur le lupin que le blé avec une perte moyenne de rendement du lupin de 8% avec les blés et de 22% avec le triticales.

L'effet de l'année sur les rendements des espèces a varié selon le mode de culture (association vs culture pure) et la variété de légumineuse (lentille et lupin), suggérant des interactions de type

génotype × environnement × conduite. Par conséquent, il est difficile de prédire la performance agronomique des associations en se basant uniquement sur les variétés et les densités des espèces.

### Acquisition des ressources (azote et lumière) dans le cas de la lentille et du blé

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 lent. En situation de faible disponibilité en azote, comme en AB, le taux de couverture du sol des cultures pures est plus élevé chez le blé en début de cycle mais son maximum (40%) est très inférieur à celui de la lentille pure (85%), qui est atteint environ 200 degré jour après celui du blé (Figure 2).

L'acquisition de la lumière dans le PAR (Rayonnement Photosynthétiquement Actif) par l'association est très supérieure à celle du blé pur durant une majorité du cycle de culture mais inférieure à celle de la lentille pure après la floraison des lentilles, toujours en condition de faible disponibilité en azote. Néanmoins, l'acquisition de PAR de l'association était supérieure à la moyenne des cultures pures. L'association bénéficie de la croissance rapide du blé en début de cycle et de la lentille en fin de cycle pour acquérir davantage de lumière. Ces **complémentarités spatiale et temporelle** expliquent la meilleure acquisition de PAR par l'association par rapport à la moyenne des cultures pures et donc, en partie, une production totale de grain plus élevée en association.

La compétition du blé sur la lentille pour l'acquisition des ressources (lumière, eau, minéraux) réduit la production de biomasse de la lentille en association par rapport à sa culture pure, ce qui explique le taux de couverture inférieur de l'association par rapport à la lentille pure à partir de la floraison des lentilles (70% vs 85% respectivement, Figure 2) ainsi que la moins bonne acquisition de PAR de l'association par rapport à la lentille pure.

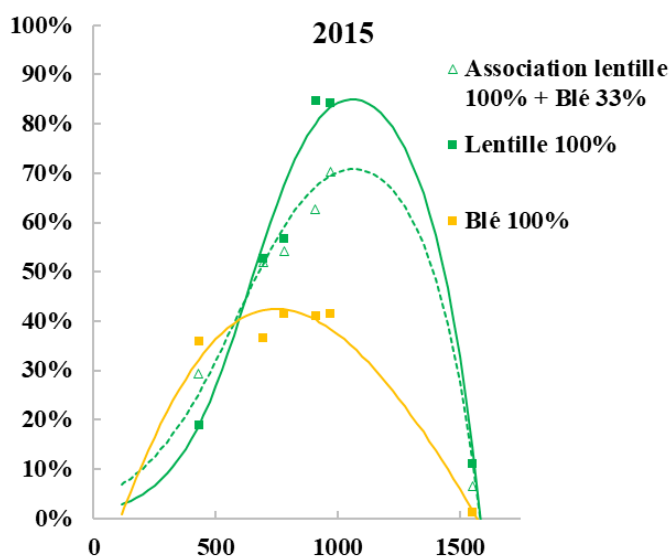


Figure 2: Taux de couverture de l'association lentille blé et des cultures pures en fonction du temps thermique

L'acquisition d'azote cumulée sur l'ensemble du cycle de la culture, est similaire entre l'association et les cultures pures de lentille et de blé, et ce, dans le cas d'une quantité d'azote minéral faible au semis d'environ 30 kg N ha<sup>-1</sup>. Le blé a prélevé en moyenne 75% de l'azote minéral acquis par l'association, ce qui indique une meilleure compétitivité du blé pour cette ressource. Nous avons montré, grâce à des mesures de l'avancée du front racinaire des lentilles et du blé que les racines du blé se développaient plus rapidement et plus profondément que celles de la lentille, ce qui permet au blé d'avoir accès à un pool d'azote minéral plus important que la lentille dans l'association. En conséquence de cette forte compétition du blé, la lentille doit compenser en fixant plus d'azote atmosphérique en association pour satisfaire ses besoins en azote (Viguié, 2018a and b).

## **Acquisition des ressources (azote et lumière) dans le cas du lupin associé au triticale ou au blé**

Le cycle de culture du lupin blanc d'hiver s'étend de fin septembre à début août. Nos résultats ont montré que le lupin était beaucoup moins compétitif que les céréales pour l'acquisition des ressources azotées du sol, et donc que les associations permettaient d'augmenter les prélèvements d'azote du sol par rapport à la culture pure de lupin par l'absorption de la céréale sur l'ensemble du profil de sol. L'étude dynamique de l'acquisition d'azote a révélé qu'en sortie d'hiver, la culture associée avait prélevé dix fois plus d'azote minéral du sol que le lupin pur. Plus tard dans le cycle, les écarts se réduisent mais restent importants.

La faible biomasse, la faible densité et les forts écartements inter-rangs du lupin pur (30 à 60 cm, contre 15 à 20 cm pour la céréale ou l'association) conduisent à une faible couverture du sol précoce. Des mesures dynamiques du taux de couverture ont montré que la fermeture du couvert de lupin pur arrivait seulement avec la croissance des ramifications, qui intervient à partir de la pleine floraison, soit début mai (près de 8 mois après le semis). L'ajout d'une céréale a permis d'avancer d'un à trois mois la fermeture du couvert, et donc d'améliorer la captation de la lumière par le couvert associé

### **Complémentarité pour l'acquisition de l'azote**

L'analyse du taux de fixation symbiotique d'azote chez la lentille comme chez le lupin a montré que dans les cultures associées les légumineuses ont un taux de fixation supérieur à celui des cultures pures (pour la lentille par exemple,  $84 \pm 2\%$  vs.  $70 \pm 6\%$  respectivement). En effet, les légumineuses à graines compensent la moindre disponibilité en azote minéral en association par un recours plus important à la fixation symbiotique. Toutefois, les quantités d'azote fixé des légumineuses étaient inférieures en association par rapport aux cultures pures, ce qui indique que l'accroissement du taux de fixation symbiotique ne permet pas de compenser totalement la compétition des céréales pour les autres ressources et notamment la lumière, faisant que la croissance des légumineuses par unité de surface est plus faible.

Enfin, la quantité d'azote acquise en association était supérieure à la moyenne des cultures pures ( $110$  vs.  $94 \text{ kg N ha}^{-1}$ ) témoignant de la complémentarité entre espèces pour l'utilisation des deux sources d'azote (minéral et air) et du taux de fixation plus élevé pour la légumineuse due à la compétition de la céréale pour l'absorption de l'azote minéral. Ce phénomène de synergie positive peut être qualifié de **complémentarité de niche** pour la ressource azotée.

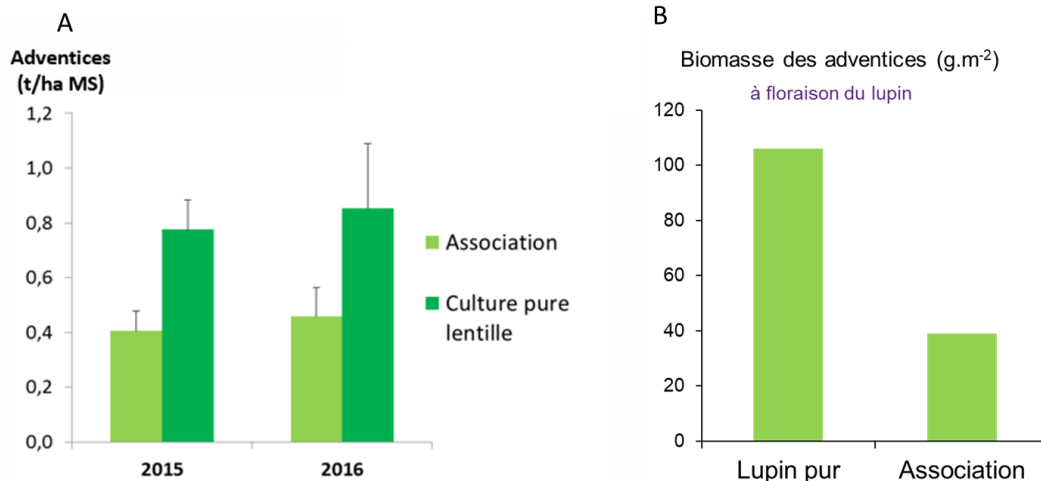
### **Amélioration du taux de protéines**

L'association de la céréale avec la lentille a permis d'améliorer le taux de protéines du blé, qui en moyenne est passé de 12% en culture pure à 13% en association. Deux mécanismes sont en jeu : une meilleure disponibilité de l'azote par plante de céréale en association et une concentration des protéines du fait de la réduction du rendement de la céréale soumise à la compétition de la légumineuse (Gooding *et al.*, 2007). L'association présente ainsi l'intérêt d'obtenir un blé à teneur en protéines supérieure, ce qui est difficile à produire en agriculture biologique avec des cultures pures, même avec de la fertilisation organique. Le triticale associé au lupin a vu son taux de protéines augmenter uniquement dans les situations où son rendement était le plus réduit par l'association. Les taux de protéines des légumineuses n'ont pas été modifiés substantiellement en associations.

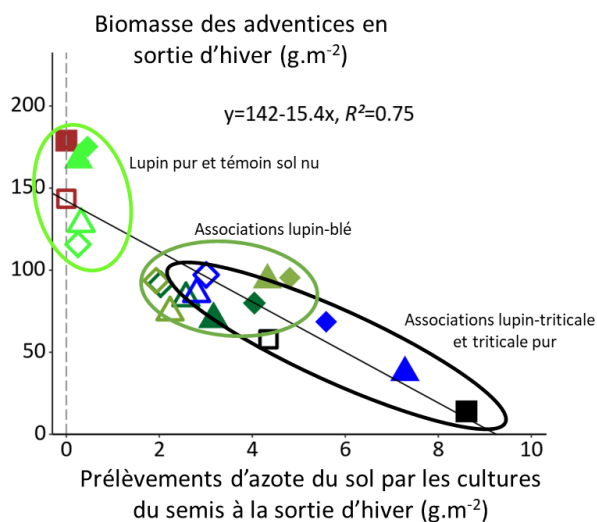
### **Effet des associations sur les verrous agronomiques adventices, bruches et verse**

Dans les deux types d'associations, l'ajout d'une faible quantité de céréale, entre 17% (lentille) et 30% (lupin) de la densité recommandée en culture pure, a permis de diminuer très significativement la biomasse des adventices (Figure 3) par rapport aux cultures pures de légumineuses (en moyenne, réduction de 41% pour la lentille et de 62% pour le lupin).





**Figure 3: biomasse des adventices dans le réseau de parcelles de comparaison A. lentille pure / lentille-blé (données LEGITIMES) ; B. Lupin pur / lupin-triticales**



**Figure 4: corrélation entre les prélèvements d'azote du sol par les cultures et la biomasse des adventices, en sortie d'hiver**

Dans le cas du lupin, nous avons montré que la réduction de la biomasse des adventices permise par l'association était très liée aux plus forts prélèvements d'azote du sol des associations principalement dû aux céréales et ce dès la sortie d'hiver (Figure 4).

Par contre, 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). Néanmoins nos résultats suggèrent des effets année et variété de lentille mais les essais n'étant pas conçus pour l'étude de la dynamique de comportement de ce ravageur, ces conclusions doivent être vérifiées en situation d'essais en grandes parcelles agricoles car la structure spatiale paysagère peut avoir une influence sur le comportement de cet insecte.

Toutefois, un point crucial est que l'association avec le blé a significativement diminué la verse de la lentille et ainsi augmenté la hauteur de la gousse la plus basse (voir Viguié *et al.* 2018b) par effet tuteur. Ceci a permis une meilleure efficacité de récolte mécanique de la lentille en association qui a conduit à un rendement récolté avec la moissonneuse similaire entre la lentille en association et en culture pure, malgré un rendement sur « pied » significativement supérieur en lentille pure (Figure 5).

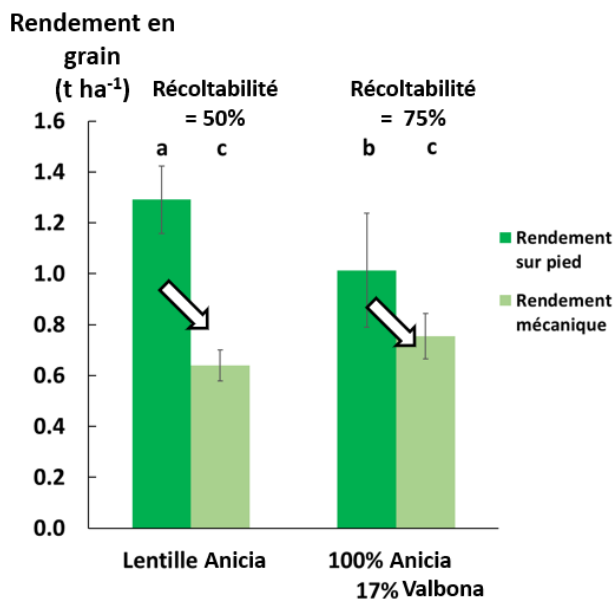


Figure 5: Efficacité de récolte de la lentille cv. Anicia en fonction du mode de culture

### Performance économique

Les travaux menés sur la lentille et le blé ont montré qu'une analyse économique basée sur le rendement sur pied (récolte manuelle) n'était pas pertinente car les pertes en grain au moment de la récolte mécanique étaient très élevées (Figure 3). Le prix de vente de la lentille étant environ 4 fois plus élevé que celui du blé dans les conditions actuelles, il est nécessaire de prendre en compte les pertes de récolte de la lentille. Nos calculs de marge brute basés sur le rendement commercialisable (rendement mécanique sorti de moissonneuse et nettoyé de tous les grains impropres à la consommation) ont indiqué que la marge brute des associations était nettement plus élevée que celles des lentilles pures (949 vs 688 € t<sup>-1</sup> respectivement ; Viguier *et al.* 2018b). De plus, la marge brute des associations était plus élevée quel que soit le niveau de rendement des lentilles pures, ce qui indique que l'association joue un rôle, à la fois, d'assurance et de bonus. **Par conséquent associer la lentille au blé est un mode de culture très prometteur pour les agriculteurs pour réduire l'instabilité des performances inter-annuelles et entre situations de production de la lentille.**

Pour le lupin, une évaluation technico-économique réalisée sur deux sites a montré que dans un contexte de fort salissement, l'association permettait d'assurer un revenu supplémentaire par la production de la céréale et de compenser le surcout lié au tri, aboutissant à une marge équivalente, ce résultat restant à confirmer avec des mesures plus nombreuses. 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 par l'application de pesticides d'herbicides), l'ajout d'une céréale réduit fortement le rendement du lupin, le rendement en protéines et ainsi la performance économique (Hubert et Vandewalle, 2017).

### Conclusions principales et quelques recommandations

Les associations légumineuses-céréales ont permis d'augmenter les rendements dans pratiquement toutes les situations testées par rapport aux cultures pures. Les travaux ont montré que la meilleure performance des associations était principalement liée à une meilleure acquisition des ressources : i) lumière, à travers des phénomènes de complémentarité de développement spatiale (surface foliaire du couvert interceptrice d'énergie incidente) et temporelle (durée de vie de l'ensemble de la surface foliaire via une complémentarité de développement des deux espèces et ii) azote, à travers une complémentarité de niche entre absorption d'azote minéral et fixation symbiotique. La performance des associations reste néanmoins la résultante d'interactions complexes de type génotype × environnement × 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 encore plus performants, notamment en conditions de bas niveau d'intrants, comme en agriculture biologique.

Associer une céréale à une légumineuse a permis de limiter fortement l'impact des adventices, qui était 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 était également un frein majeur à son développement. L'association a, dans certains cas, permis d'améliorer le taux de protéines de la céréale, ce qui est particulièrement intéressant pour le blé panifiable en agriculture biologique car cela accroît très significativement sa valeur marchande.

Les analyses économiques ont montré une meilleure performance des associations par rapports aux cultures pures, notamment pour la lentille, en situation d'agriculture biologique et pour le lupin en conventionnel. L'association légumineuse-céréale semble donc être un mode de culture pertinent pour le développement des légumineuses en France et en Europe dans les situations sans ou avec usage de peu de pesticides et de fertilisants.

La variabilité entre sites du réseau de parcelles et les différences entre années et entre modalités des essais en microparcelles ont permis d'identifier des conditions favorables à l'expression des performances de l'association, c'est-à-dire des situations où la production de la légumineuse a pu être maintenue tout en obtenant un fort contrôle des adventices et une production complémentaire de céréale. Sur la base de ces observations, nous pouvons suggérer quelques combinaisons de pratiques et des essais complémentaires pour les optimiser, pour le choix d'espèces et de densités de semis notamment.

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

Nous conseillons d'adapter le choix de la combinaison de variété de légumineuse et de l'espèce et/ou la variété de céréale au niveau de salissement et de reliquat azoté initial au semis. Afin d'exercer une forte compétitivité précoce sur les adventices, la céréale est à choisir parmi les espèces et les variétés présentant une forte croissance précoce associée à une forte compétitivité pour l'azote, un port étalé avant la montaison. La céréale doit permettre d'augmenter fortement la biomasse précoce totale de la culture mais dans le cas d'une culture à croissance tardive comme le lupin blanc d'hiver, elle ne doit pas représenter plus des deux-tiers de la biomasse des cultures à floraison de la légumineuse pour que la croissance de la légumineuse ne soit pas trop impactée. D'après nos résultats, les critères de choix de la légumineuse à graines sont sa hauteur et vitesse de développement : une variété haute sera moins impactée par la compétition de la céréale pour la captation de la lumière, ce qui peut permettre une compensation plus tard dans le cycle de la compétition précoce de la céréale.

### **Densités de semis**

D'après nos résultats, chez la lentille, la plus faible densité de blé testée (17%, qui est aussi la limite inférieure pour avoir un couvert suffisamment homogène) s'est montrée suffisante pour réduire fortement la verse. Réduire encore la densité de la céréale permettrait peut-être de mieux limiter la compétition sur la lentille tout en maintenant les services de contrôle des adventices et de prévention de la verse, toutefois le blé récolté a une forte teneur en protéines et donc une forte valeur qui permet de compenser la perte de rendement de la lentille.

Dans le cas du lupin en association avec le triticale, il paraît essentiel de sécuriser une densité minimale de lupin de 20-25 plantes/m<sup>2</sup> en sortie d'hiver pour assurer un rendement minimum de 15 q/ha de la légumineuse. Sur certains sites, les pertes à la levée et les pertes hivernales se sont avérées importantes, aboutissant à des situations où le rendement du lupin était limité par une trop faible densité de plantes. Dans certaines conditions, notamment les années à automne et hiver doux, la céréale s'est montrée trop compétitive sur le lupin. Nous recommandons ainsi de tester des densités de lupin plus élevées et des densités de céréales plus faibles que celles pratiquées dans notre étude, en particulier dans l'association avec le triticale, par exemple L115% C20%. Il serait enfin intéressant de tester d'autres espèces et variétés moins compétitives de céréales.





## **Recherches en cours pour aller plus loin**

Les résultats obtenus depuis le début des années 2000 sur les cultures associées en Europe permettent aujourd'hui d'appréhender leur fonctionnement de façon relativement complète à l'échelle de leur cycle de culture. En revanche, la question de l'intégration des cultures associées dans les rotations a peu été traitée. Il est maintenant essentiel d'analyser comment combiner plusieurs approches de diversification pour maximiser les bénéfices issus des interactions entre plantes (optimisation des successions et allongement de la rotation, couverts d'interculture ou associés, cultures associées, cultures associées relai...) C'est l'un des objectifs du projet Européen H2020 DiverIMPACTS en cours et les travaux réalisés à l'INRA de Toulouse (essai système ce culture dit MicMac-design) depuis 2010 sur des prototypes de systèmes de culture d'associations en rotation devraient permettre d'apporter de premières réponses.

La sélection de variétés pour la conduite en association pourrait permettre d'améliorer les performances des associations. En effet, les performances relatives des variétés cultivées en pur ne correspondent pas toujours à leurs performances relatives en association. Pour cela, il est nécessaire de développer des méthodes de sélection. Une possibilité est d'identifier les traits fonctionnels importants pour la performance en association et de quantifier la variabilité pour ces traits. C'est l'un des objectifs du projet Européen H2020 ReMIX en cours.

Par ailleurs, des innovations dans le machinisme pour le semis, la récolte et le tri des associations pourraient faciliter leur développement. C'est aussi l'un des objectifs du projet Européen H2020 ReMIX en cours.

Enfin, l'impact de l'association sur la qualité des produits récoltés a peu été évalué en dehors de la concentration en azote des grains de la céréale, indiquant la nécessité de réaliser des analyses sur la teneur en minéraux (N, P, K, Fe, Ca, Mg, Zn) des graines de légumineuses afin de savoir si les propriétés nutritives sont modifiées en association.

## **Références (article / livre / conférence)**

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. doi:10.1071/CP14252

Bedoussac L., Hauggaard-nielsen H., Naudin C., Jensen E. S. (2014). Ecological principles underlying the increase of productivity achieved by cereal-grain legume intercrops in organic farming. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 35:911–935. doi:10.1007/s13593-014-0277-7  
*et al.*

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.

Carr, 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.

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, B., M., Lecompte, C., Marceau, C., Mazoué, F., Mérot, E., Métivier, T., Morand, P., Naudin, C., Omon, B., Pambou, I., Pelzer, E., Prieur, L., Rambaut, G. & Tauvel, O. (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.
- 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., Pristeri, A., Romeo, M., Monti, M. & Launay, M. (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 N<sub>2</sub>-fixation, soil N acquisition and use of other nutrients in European organic cropping systems. *Field Crops Research* 113(1): 64-71.
- Jensen, E. S. (1996). Grain yield, symbiotic N<sub>2</sub> 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.
- 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.
- 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.
- Röös, E., Carlsson, G., Ferawati, F., Hefni, M., Stephan, A., Tidåker, P. & Witthöft, C. (2018). Less meat, more legumes: prospects and challenges in the transition toward sustainable diets in Sweden. *Renewable Agriculture and Food Systems*: 1-14.
- Schreuder, R. & De Visser, C. (2014).EIP AGRI focus group protein crops: final report. (Ed E. I. p. f. A. P. a. S. E. AGRI)). Brussels, Belgium.
- Willey, R. (1979).Intercropping - its importance and research needs: Part 1. Competition and yield advantages. In *Field Crop Abstracts*, Vol. 32, 1-10.
- Voisin, A.-S., Guéguen, J., Huyghe, C., Jeuffroy, M.-H., Magrini, M.-B., Meynard, J.-M., Mougél, 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.
- 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.

