

Associations céréale-légumineuse multi-services

Corre-Hellou G.¹, Bédoussac L.², Bousseau D.³, Chaigne G.⁴, Chataigner C.⁵, Celette F.⁶, Cohan J.P.⁷, Coutard J.P.⁸, Emile J.C.⁹, Floriot M.¹⁰, Foissy D.¹¹, Guibert S.¹², Hemptinne J.L.¹³, Le Breton M.¹, Lecompte C.¹⁴, Marceau C.¹⁵, Mazoué F.¹⁶, Mérot E.¹⁷, Métivier T.¹⁸, Morand P.¹⁹, Naudin C.¹, Omon B.²⁰, Pambou I.²¹, Pelzer E.²², Prieur L.²³, Rambaut G³, Tauvel O.²⁰.

¹ ESA; UR LEVA, 55 rue Rabelais 49007 Angers cedex 01

² INRA Toulouse ; UMR1248 AGIR, 31320 Castanet-Tolosan

³ Terrena ; 7 avenue Jean Joxe 49000 Angers

⁴ CA 79 ; Maison de l'Agriculture 79231 Prahecq cedex

⁵ INRA Saint Laurent de la Prée ; 545 route du Bois maché 17450 Saint Laurent de la Prée

⁶ ISARA Lyon, UP SCAB, 23 rue Baldassini – 69364 Lyon Cedex 07

⁷ ARVALIS-Institut du végétal, station expérimentale de La Jaillièvre 44 370 La Chapelle Saint-Sauveur

⁸ Ferme expérimentale de Thorigné ; La garenne de la cheminée, 49220 Thorigné-d'Anjou

⁹ INRA - Unité expérimentale fourrages et environnement, Les Verrines, 86600 Lusignan

¹⁰ AgriObtentions ; URD78 Ferme de Gauvilliers, 78660 Orsonville

¹¹ INRA Mirecourt ; Agro-Système Territoire Ressources, 662 Avenue Louis Buffet, 88500 Mirecourt

¹² CA 53 ; Parc Technopole, Rue Albert Einstein, Changé 53061 Laval Cedex 9

¹³ ENFA ; 31320 Castanet-Tolosan

¹⁴ INRA Dijon ; UMR 1347 Agroécologie, 17 rue Sully, 21065 Dijon cedex

¹⁵ CRA Bretagne ; Avenue du Général Borgnis Desbordes, 56009 Vannes Cedex

¹⁶ CA 85 ; Région Est Collines, Deux Lays, La Grénetière, 85700 Pouzauges

¹⁷ CA 44 ; Maison Régionale de Châteaubriant, 13 rue d'Angers, 44110 Chateaubriant

¹⁸ CA 14 ; ZAC Route de Caen, BP 62700, 14406 Bayeux cedex

¹⁹ CA 26 ; Avenue de la Clairette, 26150 Die

²⁰ CA 27 ; 5 rue de la petité cité, 27008 Evreux cedex

²¹ CA 49 ; 14 avenue Jean Joxé, 49000 Angers cedex

²² UMR 211 Agronomie INRA-AgroParisTech, Avenue Lucien Brétignières, 78850 Thiverval-Grignon

²³ CREAB Midi-Pyrénées, LEGTA Auch-Beaulieu, 32020 Auch Cedex 9.

Correspondance : g.hellou@groupe-esa.com

Résumé

Depuis plusieurs décennies, l'évolution de l'agriculture en France est, dans un certain nombre de régions de grande culture et d'élevage marquée fortement par la simplification des assolements accompagnée d'un usage accru des intrants et la standardisation des itinéraires techniques. Le challenge est maintenant de concevoir des agroécosystèmes plus diversifiés dans l'objectif d'une gestion écologique des parcelles cultivées devant se traduire par une amélioration de la productivité et la stabilité des systèmes face à divers aléas et la fourniture de différents services éco-systémiques. Ce projet a exploré l'augmentation de la diversité cultivée au sein de la parcelle via des associations céréale-légumineuse. Il a montré la diversité des services que l'on peut en attendre en agriculture biologique et en agriculture conventionnelle, en système céréalier et en système d'élevage. Ces associations permettent de répondre à la fois à des enjeux de production, de réduction des intrants, de réduction des impacts environnementaux des cultures, de stabilité face à des aléas biotiques et abiotiques. Le cœur du projet a consisté à tester différents leviers d'actions pour aider à l'orientation des performances de ces associations pour différents objectifs. Les atouts et contraintes d'adoption à l'échelle des filières (notamment pour les collecteurs) ont été aussi mis en évidence et quantifiés.

Mots-clés : blé, pois, cultures associées, services.

Abstract: Multiservices of cereal-legume mixtures

We have seen in the last decades in France a great simplification in crop successions in cereal farms and mixed farms with livestock with an increasing use of inputs and a standardization of crop management. The challenge is now to build more diversified agroecosystems through an ecological management of crop areas in order to increase yields and stability and to supply several ecosystemic services. This project has investigated the increase in crop diversity in space within the field through cereal-legume intercropping. Different services may be obtained in organic and conventional farming systems, in cereal and mixed farms with livestock. Intercropping can combine productivity, reduction of inputs, environmental impacts and stability against various biotic and abiotic constraints. Several practices have been tested in order to manage performance of intercrops for different aims. The advantages and constraints for different stakeholders such as collectors have been investigated and quantified.

Keywords: wheat, pea, intercropping, services

Introduction

Les associations céréale-légumineuse pourraient contribuer au développement d'une agriculture qui concilie productivité et haute valeur environnementale. Bien qu'elles connaissent un regain d'intérêt, ces associations sont toutefois encore peu cultivées en France. Elles sont surtout présentes en agriculture biologique pour l'autoconsommation dans les élevages et sont quasiment absentes des systèmes céréaliers qu'ils soient biologiques ou conventionnels. Des premiers travaux notamment dans le cadre d'un programme européen (INTERCROP Vème PCRD¹) puis dans le cadre d'un premier programme national (AAP 2005 N°431²), ont permis de mettre en avant les atouts des cultures associées céréale-légumineuse à graines à la fois en termes de productivité et de services écologiques (augmentation de la biodiversité, contrôle des bio-agresseurs, limitation des pollutions) rendus aux agrosystèmes. Dans les systèmes d'élevage (modèle triticale-pois fourrager), les associations apparaissent tout à fait intéressantes pour produire un ensilage productif, stable face aux aléas climatiques, riche en fibres et en matières azotées totales, facile à produire en raison de la présence de sucres solubles et économie en intrants (eau, azote, produits phytosanitaires) (Yvergniaux et al, 2007 ; Protin et al, 2009). Pour le débouché grains (modèle blé-pois protéagineux), les associations apparaissent, en agriculture conventionnelle, un moyen efficace pour produire autant (rendement, teneur en protéines) que la moyenne des cultures pures avec beaucoup moins d'intrants azotés et donc de consommation énergétique induite (Naudin et al, 2010 ; Bedoussac et Justes, 2010 ; Pelzer et al, 2012).

En agriculture biologique, elles offrent la possibilité de produire du blé riche en protéines (Gooding et al, 2008) (en moyenne gain de deux points par rapport à un blé pur) en l'absence de fertilisation et de produire du pois avec moins de facteurs limitant qu'en culture pure (adventices, maladies) (Corre-Hellou et al, 2011). Des associations à base de blé et de légumineuse fourragère (trèfle, luzerne) peuvent être aussi envisagées où la légumineuse n'est pas forcément récoltée et est appelée espèce compagne ou de service (Hiltbrunner et al, 2007). Comme dans le cas des associations blé-légumineuse à graines, elles permettraient de valoriser les ressources naturelles en vue de réduire l'utilisation d'intrants tout en maintenant un niveau de production élevé. Dans le cas de l'association céréale-légumineuse à graines,

¹ INTERCROP "Intercropping of cereals and grain legumes for increasing production, weed control, improved product quality and prevention of N-losses in European organic farming systems". (QLK5-CT-2002-02352). Riso National Laboratory, Danemark, l'Université de Reading , de Kassel, de Reggio Calabria, l'INRA d'Avignon et l'ESA (2003-2006).

² AAP 2005. 431. Associations céréale-protéagineux : de nombreux atouts à découvrir. Partenaires : UNIP, Arvalis, CA14, CA27, CA 79, ESA, INRA (Grignon, Lusignan, Mirecourt, Mons), CREAB, Biocivam (2005-2008).

la production de chacune des cultures associées est souhaitée et donc optimisée. Dans le cas d'associations céréale-légumineuse compagne, la légumineuse est une plante de couverture qui peut rester en place à la récolte de la céréale, et ce jusqu'à l'implantation de la culture suivante, et qui assure uniquement des fonctions agro-écologiques à l'échelle du cycle de la céréale et à plus long terme : réduction des infestations d'aventices, régulation des bio-agresseurs, piégeage du nitrate excédentaire, contribution au stock d'azote organique du sol, maintien/amélioration de la structure du sol, augmentation de la biodiversité sur la parcelle agricole.

De nombreuses questions techniques demeurent sur la conception d'itinéraires techniques pour ces associations céréale-légumineuse à graines ou fourragère et associations céréale-légumineuse compagne visant à satisfaire différents débouchés avec des niveaux élevés de production et de qualité des produits récoltés et minimisant les intrants ainsi que sur le raisonnement de la place de ces associations dans la succession de cultures.

Le fonctionnement et les performances des associations céréale-légumineuse dépendent fortement de la disponibilité en azote du milieu (Corre-Hellou et al, 2006 ; Naudin et al, 2010). La fertilisation azotée (dose et date) peut être envisagée comme un important levier pour orienter le couvert associé vers différents objectifs de proportion de chaque espèce dans le mélange final. D'autres éléments de l'itinéraire technique pourraient être ajustés tels que la densité ou le choix variétal mais ont été jusqu'ici peu explorés.

En relation avec les conditions de production soutenues jusqu'à présent, la plupart des programmes de sélection ont développé des cultivars pour la culture pure et pour un niveau d'intrants en général élevé même si sur blé, la tolérance aux maladies, ou sur pois, la tolérance à la verse, ont progressé sans pénaliser la productivité. Par ailleurs, la majorité des travaux de recherche sur les cultures associées utilise les mêmes variétés que celles utilisées en cultures pures. Cependant, quelques rares études sur espèces annuelles démontrent bien que les cultivars ne se comportent pas de la même façon en culture pure et en culture associée (Hauggard-Nielsen et al, 2001).

L'analyse des atouts et des freins des cultures associées ne peut se limiter aux avantages agronomiques mis en évidence à l'échelle de la parcelle. Leurs effets nécessitent d'être plus globalement analysés d'un point de vue à la fois agronomique, économique et environnemental par comparaison à d'autres cultures pures habituellement utilisées pour ces finalités. Les conséquences à l'échelle de la filière doivent aussi être évaluées notamment sur la faisabilité technique et économique du tri des espèces.

Dans ce programme CASDAR 8058, la dynamique de partenariat (25 partenaires) alliant des organismes de recherche, développement, formation et combinant différentes compétences dans différentes régions, a permis d'avancer sur l'identification de la diversité des services que l'on peut attendre via les associations céréale-légumineuse dans différents systèmes de production, les conditions d'obtention, les conditions d'adoption à différentes échelles dont les filières, et les leviers d'actions pour mieux les atteindre.

1. Associations céréales-protéagineux - Performances et leviers pour la récolte de fourrage

Ces associations sont pratiquées dans les élevages en agriculture biologique mais aussi en agriculture conventionnelle. Dans ce projet, nous avons évalué leurs performances dans plusieurs régions et testé des leviers qui peuvent influencer notamment la proportion de chaque espèce. Ces associations ont pour objectifs de produire un fourrage à forte biomasse avec peu d'intrants, riche en MAT (matières azotées totales) tout en diversifiant les systèmes fourragers et les sécurisant ainsi face aux aléas.

Les rendements en ensilage de l'association binaire (triticale-pois fourrager) sont en moyenne sur le réseau d'essais (CA14, 44, 49, 53, 79, 85, INRA Lusignan) et sur deux années climatiques (2009 et 2010) de 10,6 t/ha avec 34% de pois dans le rendement du mélange, une teneur en MAT de 8,8% et une teneur en MS à la récolte de 32%.

Deux leviers ont été testés dans ce réseau d'essais à savoir la **densité de semis de triticale et la fertilisation azotée**.

Un résultat marquant est la possibilité de **réduire la densité de triticale** de moitié (de 220 gr/m² à 110 gr/m²) sans pénaliser le rendement tout en améliorant légèrement la proportion de pois. Une aussi grande réduction de la densité ne serait toutefois pas à préconiser sur les parcelles à trop fort salissement.

Dans ce réseau, nous voyons par ailleurs une forte réduction de la proportion de pois dans le mélange pour les parcelles ayant des reliquats élevés (Tableau 1). Dans ces conditions, un apport d'azote de 30 à 50 unités pratiqué dans le réseau au stade épi 1cm impacte négativement cette proportion. Il augmente le rendement de la céréale et réduit celui du pois. Un apport au stade « dernière feuille (DF) » sur des parcelles à fort reliquat impacte peu le rendement de chaque espèce mais augmente la teneur en MAT.

Tableau 1 : Performances des associations triticale-pois récoltées en ensilage en fonction de la disponibilité en N minéral (CA14, 44, 49, 53, 79, 85, INRA Lusignan)

	Reliquats sortie hiver faibles (kg N minéral 0-90 cm)		Reliquats sortie hiver élevés (kg N minéral 0-90 cm)	
	< 50		> 50	
	ON	N épi 1cm	ON	N DF
Rendement total (t MS ha ⁻¹)	9,4	10,5	11,7	12,2
% pois	50	30	19	24
% MAT	9,0	8,2	8,6	10,5
% MS	31,8	35,1	31,1	29,8
Rendement triticale (t MS ha ⁻¹)	4,7	7,3	9,5	9,5
Rendement pois (t MS ha ⁻¹)	4,7	3,2	2,2	2,7

A l'INRA de Lusignan, le test de **deux dates de récolte** bien contrastées (28.1 vs 46.8% de MS) sur le rendement et la qualité apporte des résultats nouveaux (Tableau 2). La récolte plus précoce pénalise le rendement via la forte réduction de la production de triticale ; la proportion de pois est beaucoup augmentée. Ceci s'accompagne d'une amélioration notable de la qualité à la fois de la valeur protéique et de la digestibilité.

	précoce	tardive
% MS	27,3	41,8
%MS triticale	36	42,9
%MS pois	26	47,4
RDT	6,7	9,4
RDT triticale	2,5	5,9
RDT pois	4,1	3,7
% pois	55	35
% MAT	11,9	8,6
digestibilité	66	60
NDF	541	488

Tableau 2 : Effet de la date de récolte de l'association triticale-pois sur les performances de rendement et de qualité (essais de l'INRA de Lusignan), rendement en t/ha, MAT : matières azotées totales, NDF : teneur en fibres

2. Associations céréale-protéagineux en agriculture biologique – performances et leviers d’actions pour la récolte en grain

Les associations sont fréquentes en agriculture biologique. Néanmoins, l’association céréale-protéagineux dans les systèmes céréaliers biologiques pour une valorisation séparée des productions est assez rare malgré des besoins importants pour les filières (blé panifiable riche en protéine, protéagineux pour l’alimentation animale). Dans ce projet, nous avons approfondi les intérêts potentiels de ces associations et les leviers d’actions à mobiliser.

2.1 Des gains de rendements, gains de protéines, moins de facteurs limitants

En agriculture biologique, on confirme plusieurs atouts des associations : contribution à **un meilleur contrôle des adventices par rapport au protéagineux pur, amélioration de la teneur en protéines de la céréale, absence de verse du pois** (INRA Toulouse, CREAB Midi-Pyrénées, CA14, CA26). Des observations faites par l’ENFA sur les essais du réseau de l’INRA de Toulouse confirment également que les pois cultivés en association avec du blé sont aussi moins infestés par les pucerons.

Les associations ont par ailleurs montré une productivité supérieure aux cultures pures. Le LER (Land Equivalent Ratio, surface nécessaire en cultures pures pour obtenir la même production que l’association) a été calculé sur les différents essais = rendement blé associé/rendement blé pur + rendement pois associé/rendement pois pur. Les LER sont en moyenne de 1,2 indiquant **un gain de productivité de 20%**.

2.2 Faciliter la production de protéagineux biologiques

Des LER supérieurs à 1,5 sont aussi parfois rencontrés. Ils sont dus à des problèmes particuliers sur une des deux espèces en cultures pures que l’on ne retrouve pas en cultures associées. **Dans beaucoup de situations, le rendement du protéagineux dans l’association est égal à celui obtenu en culture pure** alors que les densités de semis sont moindres (figure 1). L’association céréale-protéagineux peut être clairement vue comme un moyen de faciliter la production de protéagineux (donc de protéines) en agriculture biologique.

2.3 Des résultats moins aléatoires qu’en culture pure

Des situations à forts LER sont aussi obtenues quand une espèce est fortement impactée dans un milieu particulier ; l’association peut donc être aussi intéressante via des phénomènes de **compensation** liée à la présence de l’autre espèce non affectée. Les problèmes sont ici plutôt abiotiques (gel, stress hydrique, fortes températures...).

En 2011, les essais ont tous montré que le pois était beaucoup plus affecté par la sécheresse que le blé en culture pure comme en association. En association, la présence du blé permet d’obtenir toutefois un niveau de production satisfaisant.

Ces situations contribuent à montrer que l’intérêt des associations céréale-légumineuse n’est pas dû uniquement à la complémentarité entre espèces pour les ressources (intérêt le plus souvent mis en avant dans la littérature) mais aussi à **la robustesse face à des contraintes biotiques et abiotiques**.

Plusieurs retours d’expérience indiquent que même dans des conditions d’essais très défavorables (telles que des difficultés d’implantation ou des stress hydriques), **les résultats des associations sont rarement décevants** par rapport aux cultures pures dont les résultats sont plus aléatoires dans ces conditions (INRA Toulouse, CREAB Midi-Pyrénées, CA26).

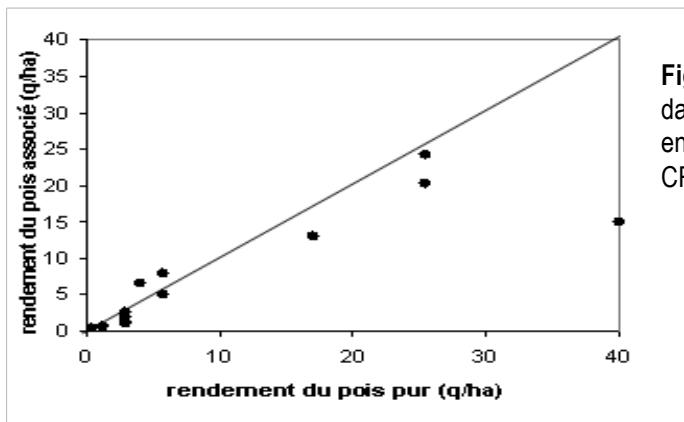


Figure 1 : Relation entre le rendement du pois dans l'association et le rendement du pois pur en agriculture biologique (INRA Toulouse, CREAB Midi-Pyrénées, CA14, CA26)

2.4 Leviers d'actions

Dans les associations blé-pois, la proportion de chaque espèce dans le mélange à la récolte est variable mais peut être en partie orientée par la **densité de semis**. Elle est influencée aussi par la disponibilité en N du milieu ; plus le milieu est pauvre, plus la légumineuse est favorisée. Dans les essais menés, il apparaît que l'association en mélange est aussi performante que celles semées en rangs alternés. Quelle que soit la **structure du peuplement** (semis en rangs ou mélange), le blé a un avantage compétitif sur le protéagineux.

Concernant le **choix des espèces**, l'association d'une céréale (blé ou triticale) avec de la féverole permet d'obtenir une plus forte part de protéagineux dans le mélange par rapport à une association avec du pois (INRA Toulouse, CA14) mais nécessite deux passages de semoir pour respecter les profondeurs de semis optimales de chaque espèce.

Etant donné la plus grande difficulté de valoriser le blé associé en alimentation humaine (problème de tri), l'**association est surtout envisagée comme un moyen pour réussir à produire des protéagineux en agriculture biologique**. Dans cet objectif, aucune fertilisation n'est nécessaire pour ne pas défavoriser le protéagineux. Le protéagineux peut être semé quasiment à sa densité en pur et une faible dose de céréale (30% de la dose en pure) est rajoutée pour jouer le rôle de tuteur et d'amélioration du contrôle des adventices.

3. Associations céréale-protéagineux en agriculture conventionnelle – performances et leviers d'actions pour la récolte en grain

Des travaux précédents avaient montré des gains de rendement en agriculture conventionnelle (comparaison des associations pois-blé ou orge-pois et des cultures pures conduites de la même façon) et que les gains étaient d'autant plus forts que la disponibilité en azote du milieu était faible (Corre-Hellou et al., 2006). Dans ce projet, nous avons approfondi les comparaisons entre les associations et les cultures pures et identifié des leviers pour envisager leur développement qui est aujourd'hui faible en agriculture conventionnelle. Plusieurs comparaisons sont possibles en fonction des objectifs recherchés.

3.1 Comparaison des associations et des cultures pures en fonction de différents objectifs

Un agriculteur cultive du blé et du pois sur son exploitation. Que gagne-t-il à les cultiver ensemble ?

On montre sur des situations non fertilisées mais aussi sur des situations fertilisées des gains de rendements de l'association par rapport à la moyenne des cultures pures et que ce soit pour des associations pois-blé tendre ou pois-blé dur. Les gains sont toutefois plus forts avec le blé tendre. (Figure 2a).

Un agriculteur cultive surtout du blé et ne veut pas réduire trop la production de blé tout en voulant insérer des légumineuses dans son exploitation. Pourquoi ne pas insérer la légumineuse en association avec le blé ?

De façon générale l'association produit à l'hectare un rendement égal ou inférieur (jusqu'à 25% inférieur) au blé pur (comparaison à même niveau de fertilisation) (figure 2b).

Fig. 2a

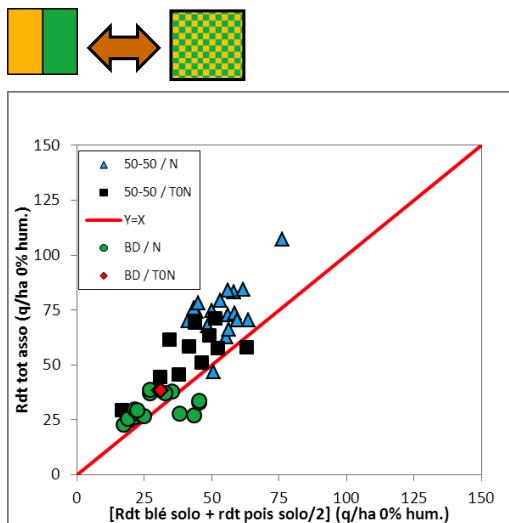


Fig. 2b

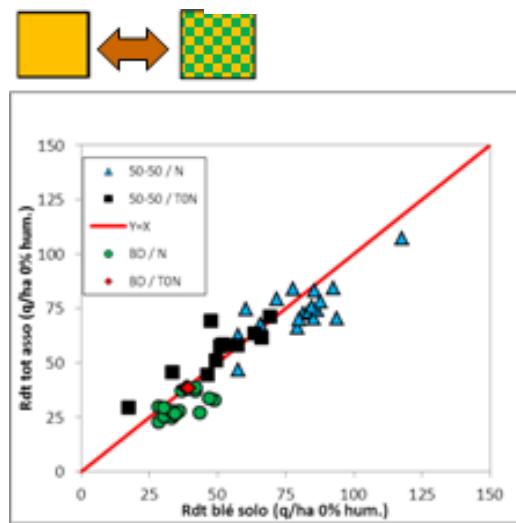


Figure 2 : Comparaison du rendement de l'association à la moyenne des rendements des cultures seules (a) et au rendement du blé seul (b). Associations 50-50 (chaque espèce semée à 50% de la densité pratiquée en culture pure). Conduite avec ou sans fertilisation ; même dose d'N en culture de blé pur et en association (Arvalis, ESA, INRA Grignon)

Un agriculteur souhaite cultiver du pois et se pose la question de le cultiver en association.

Le rendement exprimé en q/ha de l'association est toujours supérieur à celui du pois pur. L'association permet de sécuriser la production de pois par rapport à divers facteurs limitants biotiques et abiotiques et garantir une production même si une espèce est pénalisée dans un contexte climatique particulier (exemple : sécheresse en 2011 affectant plus le pois que le blé).

Un agriculteur souhaite réduire les intrants en particulier azotés tout en maintenant des niveaux de production satisfaisants. Pourquoi ne pas cultiver des associations ?

Dans ce projet, des essais ont aussi comparé des cultures associées conduites avec un niveau faible de fertilisation N aux cultures pures conduites classiquement (blé pur fertilisé selon la méthode du bilan prévisionnel). Nous mettons en évidence des niveaux de rendements pour les associations équivalents ou meilleurs (en moyenne + 10%) à la moyenne des cultures pures et pour des niveaux de fertilisation inférieurs montrant la possibilité de combiner rendement et réduction d'intrants N dans un objectif de production conjointe de céréales et de protéagineux. On réduit de 50% la dose d'N pour produire une tonne de blé associé par rapport à une tonne de blé pur (INRA Dijon, Agri Obtentions, INRA Grignon, ESA). Ces résultats confirment des travaux antérieurs (Naudin et al, 2010 ; Pelzer et al, 2012).

3.2 Leviers d'actions

Le projet a exploré l'effet du choix variétal sur les performances des associations ; ce levier n'avait été jusque-là que rarement étudié. Le projet a aussi précisé les conduites de densité et de fertilisation azotée.

Importance de la synchronisation de maturité

En fonction des combinaisons variétales pois-blé, des différences de comportement en association des variétés de pois couramment cultivées (Enduro, Lucy, James) sont observées (CA14, Terrena, ESA). La variété James a une croissance végétative moindre qu'Enduro et Lucy et a moins d'impact sur la croissance du blé. James est plus tardif à floraison et à maturité permettant un meilleur calage de maturité avec le blé. Cette synchronisation est nécessaire pour faciliter la récolte et limiter les grains cassés de pois qui seraient difficiles à trier du blé. Concernant les variétés de blé, les rendements en culture pure et en association sont plus élevés avec Orvantis et Cézanne qu'avec Caphorn.

Cézanne et Orvantis ont montré une plus grande aptitude à la concurrence que Caphorn. Cézanne est plus précoce et plus haute qu'Orvantis (INRA Dijon, CA14, Terrena). Parmi les variétés commerciales disponibles, le couple Cézanne-James peut être conseillé.

Autres traits déterminants

Si la synchronisation de maturité est importante pour la réussite de cette pratique, des travaux complémentaires à l'ESA sur des cultivars de pois plus contrastés ont montré l'importance de certains paramètres architecturaux (vitesse de développement foliaire, nombre de ramifications et de phytomères, longueur des entre-nœuds) sur le partage du rayonnement des deux espèces et par conséquent sur la part de chaque espèce dans la biomasse du mélange (Barillot et al, 2012).

L'INRA de Dijon et Agri Obtentions ont aussi exploré une plus grande gamme de variétés ou lignées de pois et notamment la comparaison des types hr et Hr.

Des variétés non adaptées en cultures pures, intéressantes en cultures associées.

Les variétés ou lignées type Hr (réactives à la photopériode pour l'initiation florale), et de ce fait plus tardives à la floraison et à maturité, valorisent très bien la culture en association puisque, bien qu'obtenant des rendements inférieurs aux hr en culture pure, elles donnent des résultats très proches en association. Ces lignées ont une forte croissance végétative et un développement peu déterminé (le nombre d'étages florifères n'est pas déterminé), ce qui les rend peu tolérantes à la verse et aux maladies aériennes du type ascochytose en pur.

Elles sont également trop tardives par rapport aux autres pois d'hiver pour échapper correctement aux stress de fin de cycle.

Mais il apparaît que la culture associée est un moyen intéressant de valoriser ce type variétal, dans la mesure où la présence du blé limite la verse et les maladies et que les deux espèces ont une maturité synchrone. Leur faible couverture au départ peut être contre un inconvénient par rapport à la compétitivité vis-à-vis des adventices. Quelle que soit la combinaison variétale, l'association produit plus que la moyenne des cultures pures en particulier pour les pois ayant de faibles rendements en culture pure (figure 3).

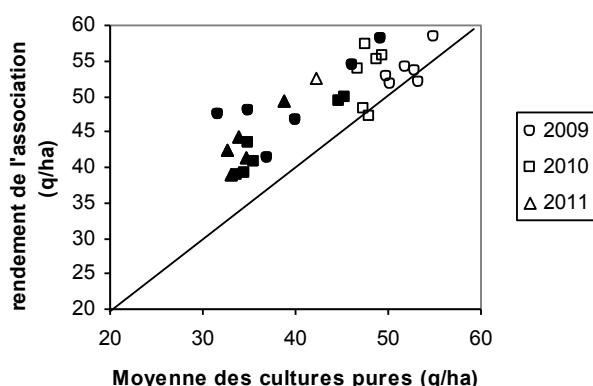


Figure 3 : Comparaison du rendement de l'association pois-blé et de la moyenne des cultures pures sur 3 années d'essais variétaux dans le cas des variétés Hr (symboles pleins) et des variétés hr (symboles vides) (INRA Dijon, Agri Obtentions)

Adapter les proportions des espèces au semis et la fertilisation en fonction des objectifs

A partir de travaux antérieurs (Naudin et al, 2010 ; Corre-Hellou et al, 2009) et complétés par des essais spécifiques dans ce projet, nous pouvons aussi dégager des combinaisons densité-fertilisation en fonction d'objectifs variés de proportion de chaque espèce dans le mélange final (Tableau 3).

Objectif	Conduite
Produire du blé et du pois mais avec une dominante de blé à la récolte, riche en protéines produit avec moins d'intrants N qu'en culture pure	Pois 30 – Blé 70 (en % des doses pratiquées en pur) Apport d'N au stade épi 1cm faible dose (50 unités environ) 2eme apport de 20 unités pour favoriser la teneur en protéines (facultatif) Pas d'apport avant épi 1cm pour ne pas défavoriser le pois
Produire du blé et du pois dans des proportions équivalentes – gain de rendement à faire les 2 espèces en même temps que séparément	Pois 70-Blé 30 (en % des doses pratiquées en pur) ; Faible apport d'N au stade épi 1cm (si les reliquats sont faibles) ou seulement un apport tardif visant à favoriser la teneur en protéines si le blé est valorisé en alimentation humaine Pas d'apport avant épi 1cm pour ne pas défavoriser le pois
Produire du pois sans les problèmes rencontrés en culture pure	Pois 100 – Blé 15-30 (en % des doses pratiquées en pur) ; pas d'apport d'N

Tableau 3 : Conduites de l'association pois-blé en fonction de différents objectifs

4. Conséquences de l'insertion d'associations dans les filières

Peu d'éléments quantifiés étaient disponibles sur l'impact des associations dans les filières dans le cas d'insertion de ces associations comme culture de vente dans les exploitations. Le partenariat avec des coopératives a permis de quantifier et partager avec les autres partenaires les atouts et contraintes de ces cultures associées à différentes échelles.

4.1 Collecter des associations céréale-protéagineux – conséquences pour une coopérative en Pays de la Loire

La coopérative Terrena a étudié les résultats de collecte en 2009 et 2010 d'associations céréale-légumineuse. En 2010, par exemple, 158 t d'associations ont été collectées en AB et des tests de tri sur 9 lots bien identifiés ont été réalisés. Les résultats du tri sont hétérogènes. Il y a systématiquement trop de grains cassés de protéagineux dans le blé empêchant la valorisation en alimentation humaine et une perte de grains non valorisés en protéagineux, perte pour le collecteur si les prix des protéagineux sont supérieurs.

Le coût du tri est estimé à 15 € la tonne comprenant l'opération stricte de démélange (7 € la tonne) et 8 € de pertes de protéagineux (non séparé du blé) et donc non valorisé au prix du protéagineux. Ce coût, s'il est répercuté sur le paiement de l'agriculteur, reste acceptable en agriculture biologique par rapport aux gains de rendement réalisés, à l'amélioration de la teneur en protéines, et aux prix de vente élevés des productions. Par contre en agriculture conventionnelle, ce coût prend une place plus importante et diminue l'intérêt de l'association malgré les diminutions de charges d'intrants. Ce coût ne prend pas en compte les investissements en cellules de stockage et séchage qui seraient aussi nécessaires. Pour le collecteur, au-delà de la qualité du tri, des difficultés logistiques sont soulignées (Bousseau, 2009) : besoin supplémentaire en capacités de stockage, disponibilité de la main d'œuvre pour traiter de façon particulière des lots en période de pointe d'activités et difficulté de

réalisation d'un échantillon représentatif pour le paiement de l'agriculteur. Pour que la valorisation du blé en alimentation humaine soit envisageable, une dilution avec d'autres lots serait nécessaire ou l'investissement dans du matériel de tri plus sophistiqué.

D'autres trieurs existent avec une meilleure efficacité mais avec un débit de chantier beaucoup moindre. Il est néanmoins possible de limiter les difficultés de tri via le choix des espèces et les variétés associées. La coopérative a observé de meilleurs résultats pour le tri du mélange blé-féverole. L'association triticale-pois pose aussi moins de problèmes que l'association blé-pois puisque la céréale est dans ce cas valorisée en alimentation animale. Par ailleurs, la coopérative trouve un intérêt à ces associations si cela permet de sécuriser un approvisionnement en protéagineux, aujourd'hui rares en particulier en agriculture biologique (association riche en protéagineux).

4.2 Mise en culture par les agriculteurs biologiques et la valorisation par les filières meunières et animales en Lorraine

L'INRA de Mirecourt (en partenariat avec CGA Lorraine et Probiolor) a mené une expérience « grandeur nature » de production et valorisation en meunerie d'associations en agriculture biologique en Lorraine. Des associations blé-pois fourrager ont été conduites sur 6 sites en comparaison avec du blé pur. Le rendement du blé associé est égal à 80% de celui du blé pur, auquel s'ajoute la production d'Assas. La teneur en protéines est nettement améliorée pour une des 2 variétés. L'indice de Zélény est meilleur pour tous les blés associés. Les tests de panifications ne montrent pas de différences entre modalités et sites. Le blé à 12% de protéines est valorisé à 320 euros/t (-10 euros par point de protéines en moins) et le pois à 260 euros/t; le mélange est rentable si le rendement du blé/pois est 30% supérieur au rendement du blé pur.

L'insertion du blé en mélange dans les systèmes de culture actuels (polyculture-élevage) peut se faire en remplacement de céréales secondaires (orge, avoine, triticale...). Toutefois, les contraintes d'élevage (besoins en céréales et fourrages) et les associations céréale-légumineuse (triticale-pois) dans les rotations actuelles restreignent les possibilités. Pourtant, l'intérêt des agriculteurs pour le blé associé est certain en raison de sources azotées insuffisantes et de teneurs en protéines trop basses sur des blés en milieu de rotation.

Le tri est réalisé à la ferme (nettoyeur séparateur à grilles horizontales); le pois est trié comme un déchet. Le tri à la ferme permet de valoriser le protéagineux par le troupeau (diminution des achats de concentrés), ou de favoriser la collecte par filière (meunerie, aliment du bétail). Pour réaliser un bon tri, il s'agit d'un compromis entre l'équipement de tri et stockage, le choix variétal (taille des graines, facilité de battage des graines) et le réglage de la moissonneuse-batteuse. La commercialisation du blé issu d'associations est délicate, car toutes les brisures de pois ne peuvent être enlevées. Le critère de propreté des lots est très difficile à atteindre et constitue le principal frein à l'écoulement en filière meunière. La situation est paradoxale car le blé associé permet de répondre au critère de teneur en protéines.

4.3 Insertion d'associations dans la filière blé dur dans le sud de la France

L'INRA de Toulouse (UMR Agir) a réalisé une étude approfondie au niveau de la filière blé dur sur les conditions d'adoption des associations (dans le cadre du projet ANR PerfCom en interaction avec le présent projet CASDAR). Les mêmes problèmes de tri que ceux décrits dans les cas précédents ont été observés : avec le matériel de tri de la coopérative AgriBio Union, le blé dur présente un taux d'impuretés encore trop élevé pour une valorisation en alimentation humaine. Pour la transformation pastrière, une part de protéagineux dans le blé n'est pas nécessairement préjudiciable mais les transformateurs préfèrent des produits les plus homogènes possibles. Une analyse de la filière montre que l'adoption des cultures associées dans les exploitations peut entraîner des changements importants représentant des coûts et bénéfices variés. Au-delà du tri considéré comme le point le plus critique, le conseil pour ces pratiques innovantes est aussi un point clé. Par ailleurs, le nombre restreint

des semouliers et pastiers dans la filière blé dur freine le développement de ces systèmes productifs innovants.

Toutefois, les cultures associées peuvent être vues comme une occasion pour les transformateurs de développer des produits à plus forte valeur environnementale, afin de se différencier sur le marché. Lors d'enquêtes, les coopératives indiquant que leur logistique serait *a priori* compatible avec ces nouvelles pratiques sont celles qui sont les plus orientées vers une gestion de la qualité ; ce sont celles aussi qui possèdent des trieurs performants et des marges de manœuvre concernant le temps de passage pour le tri de ces mélanges. Dans tous les cas, le développement des cultures associées nécessite une coordination efficace des acteurs le long de la filière pour atteindre cet objectif.

5. Évaluation environnementale des cultures associées par rapport aux cultures pures

Les acteurs internes et externes au projet sont demandeurs d'une analyse la plus globale possible des intérêts et limites d'un point de vue agronomique, d'un point de vue de la filière mais aussi sur les impacts environnementaux des associations céréale-légumineuse comparativement aux cultures pures. La mise en évidence de bénéfices environnementaux majeurs peut être décisive dans la mise en œuvre dans les années à venir de ce type de pratiques.

Les données utilisées pour mettre en œuvre cette évaluation multicritère proviennent d'une part des essais du présent projet CASDAR pour ce qui est du volet agronomique de l'évaluation, et d'autre part d'un panel d'experts consultés pour les volets environnemental et économique. Pour cette étude, la méthode d'Analyse de Cycle de Vie a été mise en œuvre afin d'évaluer les impacts environnementaux potentiels des associations en comparaison à des cultures pures de blé tendre d'hiver et de pois protéagineux d'hiver pour les catégories d'impacts « changement climatique », « demande en énergie », « eutrophisation » et « occupation des terres » (Naudin et al, 2012). Cette évaluation a été réalisée pour des stratégies de conduites et d'insertion de mélanges blé-pois d'hiver définies à dire d'experts, et adaptées aux régions Pays-de-la-Loire et Normandie. Les associations blé-pois permettent de produire autant voire plus que les cultures pures de blé et de pois tout en garantissant un produit de qualité et cela avec moins d'intrants qu'en culture pure. Une réduction des intrants permet aux associations biologiques d'afficher une rentabilité très intéressante en comparaison aux cultures pures. D'autre part, comparées à des combinaisons de cultures pures qui produisent les mêmes quantités à l'hectare, les associations présentent des impacts environnementaux potentiels inférieurs aux cultures pures, quelle que soit la catégorie d'impacts considérée. A production équivalente, une association blé-pois a des impacts d'environ 30 à 60% inférieurs aux cultures pures concernant le changement climatique (émissions de GES) et la demande en énergie. A surface équivalente, l'association réduit l'eutrophisation jusqu'à 77% dans certains systèmes testés. Ce travail a permis de mettre en évidence les avantages agronomiques, économiques et environnementaux certains des associations culturales blé-pois dans des systèmes de production céréaliers en régions Pays de la Loire et Normandie. Néanmoins, ces avantages restent à nuancer selon le mode de production étudié (agriculture conventionnelle raisonnée ou biologique), le raisonnement de la succession culturelle (gestion des reliquats azotés et des périodes de sols nus), les pratiques culturales adoptées (fertilisation des associations) et les unités d'expression des résultats (impacts par kg de produit ou par hectare de terre occupé, à production équivalente ou à surface équivalente).

6. Cas des associations céréale-légumineuse où la légumineuse n'est pas récoltée

6.1. Association blé-légumineuse compagne, légumineuse détruite pendant la montaison

Dans ces associations blé-légumineuse, la légumineuse est semée en même temps que la céréale en tant que plante de service. Elle est détruite pendant la montaison dans l'objectif de restituer, par minéralisation des parties aériennes et du système racinaire, de l'azote à la céréale. La légumineuse doit être suffisamment développée pour fournir une quantité significative d'azote après sa destruction sans pour autant exercer une concurrence trop importante pour l'eau et la lumière vis-à-vis du blé. Un réseau de 14 essais a été mis en place par ARVALIS-Institut du végétal dans le cadre du projet et a consisté à comparer les performances d'une céréale seule (blé tendre d'hiver et de printemps) avec différents mélanges associant du blé semé à la même densité que le blé seul et soit du pois, soit de la vesce semés à différentes densités. Afin d'évaluer l'impact de la technique d'association sur la gestion de la fertilisation azotée, plusieurs niveaux de fertilisation azotée ont été testés. Le réseau d'essais n'avait pas pour objectif de délivrer des orientations précises d'itinéraires techniques mais de déterminer les enjeux que l'on peut viser. Les légumineuses se sont développées de façon hétérogène (0 à 2,5 t de MS/ha) pour des quantités d'N accumulées de 0 à 80 kg/ha. Le niveau de croissance de la légumineuse est plus élevé quand elle est détruite tard et semée dense. Dans 49% des situations (zone 1 de la figure 4), la légumineuse n'a pas eu d'impact ni sur le rendement ni sur la teneur en protéines du blé en raison d'un trop faible développement de la légumineuse (Cohan, 2012). Dans 27% des situations (zone 2 de la figure 4), le blé a subi une réduction de son rendement et un enrichissement en protéines (en raison du phénomène de concentration de l'azote dans le grain dans les cas de chute de rendement).

Dans le reste des situations (24%, zone 3 de la figure 4), la technique apporte un gain de protéines (de +1 à +4%) à rendement de blé quasiment équivalent. Dans ces situations, la légumineuse s'est développée suffisamment jusqu'au stade 1 à 2 nœuds pour lui restituer une part de son azote après destruction sans pour autant concurrencer le blé. La fourniture d'azote est tardive dans le cycle du blé. Elle agit donc logiquement uniquement sur l'absorption tardive et donc sur la teneur en protéines de la céréale. Il est difficile de faire une analyse par espèce car l'effet « année » est très fort et toutes les espèces n'étaient pas présentes tous les ans.

Trois conclusions émergent de ce travail :

- Si l'itinéraire technique est maîtrisé (développement de la légumineuse suffisant mais sans concurrence vis-à-vis du blé), la technique d'association avec une plante de service permet une fourniture d'azote à la céréale ;
- Cette fourniture d'azote arrive tardivement dans le cycle de la céréale, réservant cette technique à des situations à enjeux qualitatifs du grain sans objectif d'amélioration du rendement ;
- Enfin, la réussite d'un tel itinéraire technique s'avère délicat, tant les interactions milieu/légumineuse/céréale sont complexes. L'échec implique deux types de risques : soit un faible développement de la légumineuse, soit un développement non maîtrisable préjudiciable pour le blé.

Développer la technique pour les contextes de production à même de valoriser ses avantages (recherche d'une haute qualité du grain sous contrainte de recours aux engrangements azotés de synthèse par exemple) nécessiterait des travaux complémentaires pour sécuriser l'itinéraire technique.

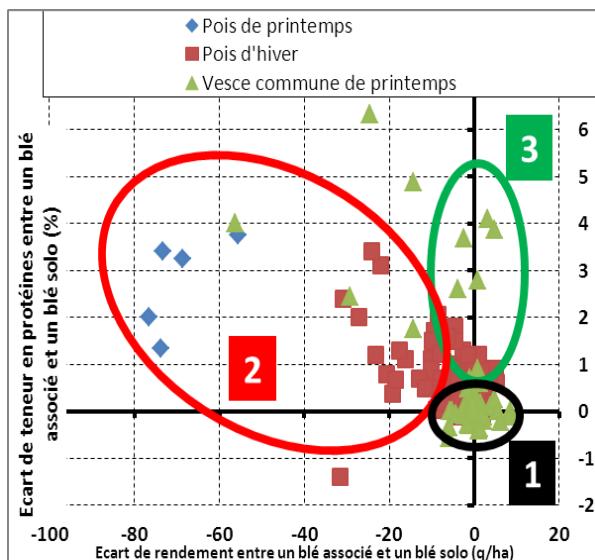


Figure 4 : Relation entre l'effet de l'association sur le rendement et sur la teneur en protéines d'un blé, à dose d'engrais azoté équivalente.
*tests statistiques de Student (méthode des couples) significatifs à 5%.

6.2. Association blé-légumineuse compagne, légumineuse semée dans le blé au printemps

En 2009 et 2010, un réseau de 8 parcelles expérimentales a été mis en place par l'ISARA-Lyon chez des agriculteurs biologiques de la région Rhône-Alpes présents dans les départements du Rhône, de l'Isère et de la Drôme dans des conditions pédoclimatiques diversifiées. L'insertion de légumineuses fourragères sous couvert d'une culture de blé au printemps a été étudiée. Seul le blé est récolté en grains tandis que la légumineuse fourragère est préférentiellement utilisée comme engrais vert mais peut ponctuellement être récoltée comme fourrage. Les principaux objectifs de ces essais étaient d'évaluer la performance de l'association mais aussi de connaître la contribution de la légumineuse pour la culture suivante (culture de printemps, maïs ou blé). Deux facteurs principaux ont été testés : le choix de l'espèce de légumineuse (trèfles violet et blanc, minette, luzerne) et l'apport ou non de fertilisation azotée au printemps. Les rendements du blé en grain obtenus varient de 2,1 à 4,7 T de MS en 2009 et 2010, les teneurs en protéines varient entre 9,3 et 10,6% de matière sèche sans fertilisation azotée. Ces ordres de grandeur sont comparables à ceux observés habituellement dans la région. L'insertion d'une légumineuse fourragère n'impacte pas le rendement du blé.

Pour autant, le couvert de minette (*Medicago lupulina*), qui présente le développement le plus important pendant la phase d'association, semble concurrencer dans certains cas le blé et entraîne une diminution de la teneur en protéines significative sur quelques sites. Cette diminution de la teneur en protéines n'est apparemment pas la conséquence d'une compétition directe pour l'azote puisque l'essentiel de l'azote consommé par la légumineuse provient de sa capacité à fixer l'azote atmosphérique (Figure 5) (Amossé et al, 2013a). Pendant la phase d'association avec le blé, minette et trèfle violet (*Trifolium pratense*) présentent la croissance la plus forte, alors que le trèfle blanc (*T. repens*) s'installe plus lentement. L'installation plus lente de ce dernier semble être la conséquence d'une plus grande sensibilité de cette espèce au manque de lumière induit par la présence du blé associé. Dans la plupart des cas, les couverts permettent une réduction significative de la densité d'adventices à la récolte du blé. Les modalités avec minette ou trèfle violet présentent les densités d'adventices les plus faibles à ce moment-là du fait d'une concurrence plus forte imposée par le couvert. En effet, ces deux espèces sont celles présentant la croissance la plus rapide pendant la phase d'association (Amossé et al, 2013b). Pendant la phase d'interculture, après la récolte du blé, certaines espèces (minette et luzerne – *Medicago sativa*, notamment) souffrent plus que les autres de la chaleur et de la sécheresse estivale. Pour autant, les couverts correctement implantés reprennent leur croissance dès les premières précipitations de la fin de l'été. Le trèfle blanc présente la meilleure croissance pendant cette phase, suivi du trèfle violet. Sur les modalités avec un couvert, une réduction

forte de la croissance des adventices a été observée. Les trèfles (violet et blanc) empêchent même toute croissance d'adventices pendant cette phase (moins de 30 kg/ha d'adventices observés à la fin de l'automne) (Amossé et al, 2013b). Généralement, les espèces choisies souffrent du gel et ne poussent plus pendant l'hiver. Pour plus de sécurité, les parcelles ont été labourées avant implantation de la culture de printemps suivante. Les quantités d'azote apportées par le couvert représentent de 40 à 100 kg/ha suivant les espèces (figure 5). Cet azote n'est que partiellement utilisé par la culture suivante. En moyenne, la culture suivante a tout de même absorbé 40 à 50 kg/ha d'azote en plus lorsqu'elle suit une modalité avec couvert. Ceci a conduit à un rendement supérieur au témoin sans couvert de l'ordre de 30% (2 à 3 t/ha dans le cas d'un maïs grain irrigué) sans différence notable entre les espèces de couvert.

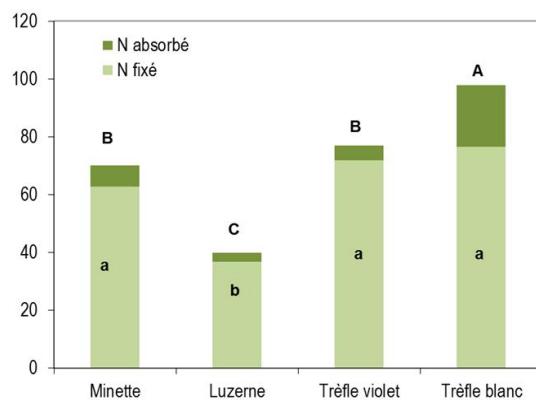


Figure 5 : Azote accumulé (kg/ha) dans les parties aériennes par les légumineuses (automne) (ISARA-Lyon)

En conclusion

Ce projet a permis de préciser les différents services que l'on peut attendre des cultures associées, de les hiérarchiser et de repérer des leviers d'actions pour mieux les atteindre. **Dans les systèmes d'élevage, les services attendus** des cultures associées (modèle triticale-pois fourrager) sont confirmés. D'après des enquêtes auprès des agriculteurs pratiquant ces mélanges (axe non développé dans ce papier), en fonction des régions et des exploitations, les priorités peuvent varier : critère de stabilité de production prioritaire dans des conditions à forte contrainte hydrique, critère d'économie d'intrants prioritaire dans des bassins versants à risques par exemple. L'analyse des marges de manœuvre pour l'acceptation de cette pratique à l'échelle de l'exploitation serait néanmoins à approfondir. Ces associations ne visent pas à se substituer exclusivement à tel ou tel fourrage (maïs notamment) cultivé dans les exploitations d'élevages mais elles visent clairement à sécuriser les systèmes fourragers et accroître l'autonomie alimentaire. La part de chaque espèce dans le mélange final est déterminante. Les critères de qualité du fourrage en dépendent ainsi que la sensibilité à la verse. Nous avons identifié des **règles de décisions concernant la gestion du couvert en fonction de la disponibilité en azote** pour mieux maîtriser la proportion des espèces. Des agriculteurs réalisaient trop souvent une conduite proche d'une céréale pure avec une fertilisation trop élevée par rapport aux objectifs attendus. **Des nouvelles variétés** de pois fourrager adaptées à la culture associée permettront aussi de contribuer à l'atteinte des objectifs. **La date de récolte** a été vue aussi comme un moyen d'influencer la qualité de la production jugée pour certains trop faible par rapport à d'autres fourrages. En production de grains, en agriculture biologique, face aux fortes contraintes auxquelles doivent faire face les systèmes, les associations sont une pratique qui retient l'adhésion de beaucoup d'agriculteurs et même celle des collecteurs. Etant donné les difficultés de valorisation du blé en alimentation humaine, l'intérêt se porte toutefois davantage sur **l'objectif de production de protéagineux sans les difficultés rencontrées en culture pure**. Les collecteurs ont en effet des difficultés à s'approvisionner en matières protéiques locales et seraient prêts à accepter ces

associations dans l'idée de sécuriser davantage cet approvisionnement et sa traçabilité pour la forte demande de l'alimentation animale biologique (porcs et volailles).

En agriculture conventionnelle, l'intérêt est grandissant pour ces pratiques face à la nécessité de trouver des pratiques combinant performances de production et réduction des impacts environnementaux. Les efforts demandés de réduction des intrants (par le programme Ecophyto 2018 par exemple) se traduisent encore toutefois davantage par la recherche de solutions partielles que par la mise en œuvre d'approches plus multicritères.

Les habitudes de gestion homogène des parcelles freinent l'adoption de mélanges plus complexes à gérer dont on n'a pas de recette toute faite garantissant à coup sûr un niveau de résultat souhaité. Cette acceptation de l'incertitude est plus couramment admise chez certains agriculteurs intéressés par ces pratiques principalement pour **accroître la résilience globale de leurs systèmes de production** plus que par l'atteinte d'objectifs annuels sur chacune des cultures. Ces agriculteurs expérimentent et adaptent leurs combinaisons d'espèces à leurs conditions. Cette diversité de combinaisons d'espèces n'est par contre pas en phase avec les contraintes des collecteurs préconisant un ou deux types de mélanges pour ne pas multiplier les difficultés logistiques et les coûts associés. Cette diversité des combinaisons d'espèces est plus facile à développer dans les systèmes d'élevage

Les expérimentations menées dans ce projet nous ont permis de **préciser les itinéraires techniques pour des objectifs variés de production de grains et d'explorer des leviers jusque-là peu étudiés comme le choix variétal** ; ils ont aussi amené à envisager différents types d'associations, et non seulement l'association modèle de départ pois-blé (pour une récolte grains), afin de mieux répondre à certains objectifs et contraintes de collecte, y compris des associations où la légumineuse n'est pas récoltée.

Ce projet a confirmé l'importance de la disponibilité en N comme facteur de variation des performances en fourrage ou en système céréalier. Par contre, des facteurs restent à mieux explorer comme la réponse de l'association au stress hydrique. D'autre part, dans ce projet, plusieurs situations ont mis en évidence l'intérêt des associations dans des conditions biotiques ou abiotiques contraignantes. La mutualisation des résultats de ce projet ainsi que d'autres références antérieures ou en cours d'acquisition devrait permettre de mieux évaluer cette amélioration de la stabilité permise par les associations. Enfin même si certains essais montrent l'intérêt des associations pour réduire certains bioagresseurs (adventices, pucerons, antrachnose...), les pressions de maladies étaient faibles sur les années testées dans ce projet rendant difficile la quantification de la réduction possible via les associations des IFT (indice de fréquence de traitement) en agriculture conventionnelle. Des essais antérieurs avaient déjà montré aussi la difficulté de mettre en évidence des effets majeurs sur ce point (Pelzer et al, 2012).

Les résultats de l'évaluation environnementale mettent en avant par rapport à d'autres leviers techniques précédemment testés le fort intérêt des cultures associées pour **réduire considérablement les impacts environnementaux**. L'analyse conjointe des résultats de cet outil avec d'autres méthodes d'analyse multicritères est à poursuivre.

Pour tous les partenaires du projet, ces travaux nous amènent probablement à aborder plus sereinement la question de systèmes plus diversifiés quels qu'ils soient. Des comparaisons, des rapprochements entre plusieurs formes d'associations ont été réalisés lors des échanges : deux espèces récoltées, une espèce récoltée et une autre non récoltée, les cultures intermédiaires, etc... ; des difficultés méthodologiques (évaluation du statut N, quels témoins choisir dans les comparaisons, pertinence des courbes de réponse, analyses multicritères de ces associations) ont été discutées. Ce fut l'occasion aussi, principalement pour les équipes de recherche, de reposer la question de la résilience de ces systèmes. La recherche de leviers d'action pour piloter finement ces couverts a peut-être été un objectif trop marqué dans nos projets. **Une volonté de pilotage trop fort de ces systèmes complexes masque en partie l'objectif de la résilience plus forte à des contraintes biotiques et**

abiotiques ; cet objectif devrait sans doute être remis en avant dans la suite de nos travaux pour mieux répondre aux nouveaux besoins de l'agriculture à court et moyen termes.

Références bibliographiques

- Amossé C., Jeuffroy M.H., David C., 2013a. Relay intercropping of legume cover crops in organic winter wheat: Effects on performance and resource availability, *Field Crops Research* 145, 78-87
- Amossé C., Jeuffroy M.H., Celette F., David C., 2013b. Relay-intercropped forage legumes help to control weeds in organic grain production. *European Journal of Agronomy* <http://dx.doi.org/10.1016/j.eja.2013.04.002>.
- Barillot R, Combes D, Chevalier V, Fournier C, Escobar-Gutierrez AJ. 2012. How does pea architecture influence lightsharing in virtual wheat-pea mixtures? A simulation study based on pea genotypes with contrasting architectures. *AoB PLANTS* 2012 :pls038; doi:10.1093/aobpla/pls038.
- Bedoussac L., Justes E., 2010. The efficiency of a durum wheat-winter pea intercrop to improve yield and wheat grain protein concentration depends on N availability during early growth. *Plant and Soil* 330, 19-35.
- Bousseau D., 2009. Associations céréales-légumineuses et mélanges de variétés de blé tendre : point de vue agronomique et pratique d'une coopérative. *Innovations Agronomiques* 7, 129-137.
- Cohan JP., 2012. Plante partenaire. Associer une légumineuse à un blé ne favorise au mieux que la protéine. *Perspectives Agricoles* 391, 56-60.
- Corre-Hellou G., Fustec J., Crozat Y., 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.
- Corre-Hellou G., Naudin C., Malagoli P., Jeuffroy M.H., 2009. Fertilisation azotée d'association céréale-légumineuse. In International Workshop : L'Europe de la fertilisation, 3-4 février 2009. Agrocampus Ouest, Rennes.
- 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. Competitive ability of pea-barley intercrops against weeds and interactions with crop productivity and soil N acquisition. *Field Crops Research* 122, 264-272
- Gooding M., Kasynova 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. 2008. Intercropping with pulses to concentrate nitrogen and sulphur in wheat. *Journal of Agricultural Science* 145 (5), 469-475.
- Hiltbrunner et al, 2007. Legume cover crops as living mulches for winter wheat: components of biomass and the control of weeds. *European Journal of Agronomy* 26, 21-29
- Hauggaard-Nielsen H., Jensen E.S., 2001. Evaluating pea and barley cultivars for complementarity in intercropping at different levels of soil N availability. *Field Crops Research* 72(3), 185-196
- Naudin C., Corre-Hellou G., Pineau S., Jeuffroy M.H., 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
- Naudin C., Van Der Werf H., Jeuffroy MH., Corre-Hellou G., 2012. LCA applied to pea-wheat intercrops: the significance of allocation. 8th International Conference on LCA in the Agri-Food Sector, Rennes, France, 2-4th October 2012.
- Pelzer E, Bazot M, Makowski D, Corre-Hellou G, Naudin C, Al Rifaï M, Baranger E, Bedoussac L, Biarnès V, Boucheny P, Carrouée B, Dorvillez D, Foissy D, Gaillard B, Guichard L, Mansard MC, Omon B, Prieur I, Yvergniaux M, Justes E, Jeuffroy MH, 2012. Pea-wheat intercrops in low-input conditions combine high economic performances and low environmental impacts. *European Journal of Agronomy* 40, 39–53

Protin P.V., Corre-Hellou G., Naudin C., Trochard R., 2009. Impact des pratiques de fertilisation sur la productivité des prairies et mélanges céréales - protéagineux et la qualité du fourrage. Fourrages 198, 115-130.

Yvergniaux M. et al, 2007. Assessment of various winter legume-cereals intercrops for forage use in various locations in France. 6th European Conference of Grain Legumes.