



Les cultures associées céréale / légumineuse : en agriculture "bas intrants" dans le sud de la France, projet PerfCom - Peuplements Complexes Performants en agriculture à bas intrants

Laurent Bedoussac, Laetitia Bernard,, Alain A. Brauman, Jean-Pierre Cohan, Guénaëlle Corre-Hellou, Dominique Desclaux, Joëlle Fustec, Max Haefliger, Etienne-Pascal Journet, Santiago Lopez Ridaura, et al.

► To cite this version:

Laurent Bedoussac, Laetitia Bernard,, Alain A. Brauman, Jean-Pierre Cohan, Guénaëlle Corre-Hellou, et al.. Les cultures associées céréale / légumineuse : en agriculture "bas intrants" dans le sud de la France, projet PerfCom - Peuplements Complexes Performants en agriculture à bas intrants. , 2012. hal-02811413

HAL Id: hal-02811413

<https://hal.inrae.fr/hal-02811413v1>

Submitted on 6 Jun 2020

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

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

Les Cultures Associées

Céréale / Légumineuse

En agriculture « bas intrants »
dans le Sud de la France

Projet PerfCom
Peuplements Complexes
en agricultures bas intrants



Sommaire

	Préambule	3
	Cultures associées : définition, principes, historique, évaluation	4
	Le projet PerfCom	5
	Réseau d'agriculteurs et d'essais expérimentaux	6
	Performances agronomiques	9
	Performances économiques	21
	Filière	22
	Points de vue des acteurs	24
	Bilan forum associations de cultures	26
	Conclusion et perspectives	27



Au cours des dernières décennies, l'utilisation d'intrants a permis d'augmenter significativement la productivité des agro-écosystèmes, mais dans le cas de l'azote (N) et du phosphore (P), cette augmentation s'est accompagnée d'une diminution significative de l'efficience de N et P. Cela est en partie lié à des pertes de N et P conduisant à des impacts négatifs sur l'environnement, tels que l'eutrophisation des eaux de surface, la pollution des nappes phréatiques ou l'émission de gaz à effet de serre. En vue de **maintenir une productivité élevée des agro-écosystèmes, de la stabiliser tout en minimisant ces impacts négatifs sur l'environnement**, il est nécessaire de développer des innovations pour cheminer désormais vers une «**intensification écologique**» des agro-écosystèmes, pour une meilleure efficience d'utilisation des ressources en N et P du sol. Dans nos travaux de recherche, nous avons postulé que la faible efficience de N et P dans les agro-écosystèmes des pays développés tient à la faible diversité fonctionnelle des couverts végétaux utilisés en grande culture. En effet, dans un peuplement mono-spécifique mono-variétal, tels que sont la plupart des champs cultivés, toutes les plantes d'une même parcelle sont en compétition pour les mêmes ressources, utilisant les mêmes pools de N et P du sol, tout en laissant de côté d'autres pools. Dans un peuplement complexe associant plusieurs variétés d'une même espèce, voire plusieurs espèces, il faut s'attendre, si celles-ci sont suffisamment différentes d'un point de vue fonctionnel, à ce que des interactions positives (facilitation, complémentarité) prennent le pas sur les interactions négatives (compétition) entre plantes. Il peut ainsi en résulter **un meilleur partage des ressources du sol, comme nous l'avons étudié récemment dans le cas de cultures associées céréale-légumineuse**.

Cette plaquette a pour objet de rassembler le fruit des recherches réalisées sur cette problématique, au travers de la **collaboration de plusieurs équipes de recherches** de l'INRA de Montpellier et Toulouse, de l'IRD de Montpellier, de l'ESA d'Angers, ainsi qu'Arvalis, l'Institut du Végétal et le Biocivam de l'Aude. Une **partie de ces recherches a été conduite dans un cadre participatif avec des agriculteurs de deux régions du sud de la France**, en Camargue et Pays Cathare – Lauragais principalement.



association blé dur / pois Rabastens / Tarn 2010 (Photo Pierre Castillon)

La plupart des recherches qui sont ici présentées, ont été réalisées entre 2009 et 2012 dans le cadre du projet PerfCom financé par le Programme Systerra de l'Agence Nationale de la Recherche (ANR). Elles se sont attachées à estimer les performances agronomiques de peuplements complexes, associant plusieurs espèces (blé dur et légumineuse) ou variétés de blé dur dans une même parcelle agricole, en vue de mieux exploiter les processus écologiques et ressources du sol, notamment N et P, en vue de réduire l'utilisation des intrants fertilisants. Leur objectif était également de comprendre ces processus écologiques sous-jacents.

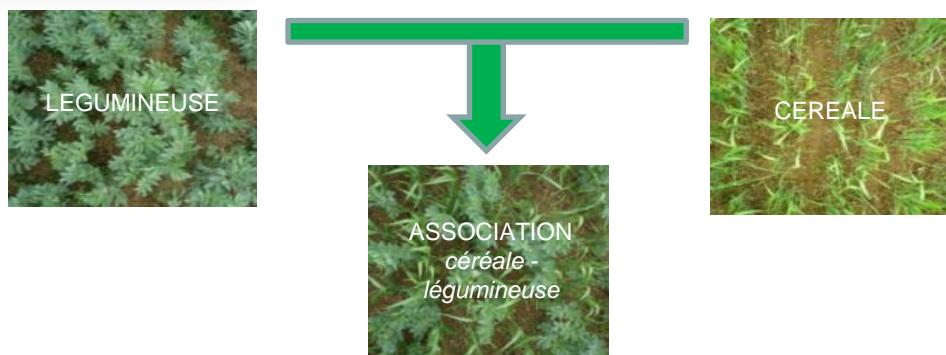
Les cultures associées peuvent présenter d'autres avantages relativement aux peuplements mono-spécifiques, par exemple en ce qui concerne la **résistance aux bio-agresseurs**, ou la **limitation de la concurrence des adventices**. Bien que ces points n'aient pas fait l'objet de recherches dédiées dans le cadre du projet PerfCom, ils seront également présentés succinctement. Outre ces divers avantages, les cultures associées posent cependant un certain nombre de problèmes qui constituent autant de **freins à l'adoption de cette innovation en grandes cultures**, en conventionnel comme en agriculture biologique. Ces freins et leurs racines sont également discutés dans cette plaquette, qui rassemble les **points de vue de divers agriculteurs des zones d'étude, ainsi que ceux d'acteurs importants de la filière avale** (coopératives de collecte, industriels pastiers/semouliers).

Les cultures associées



Nodosité des racines

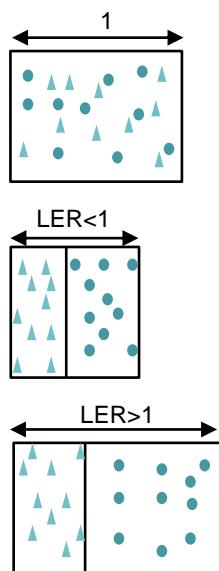
Il s'agit de la **culture simultanée de deux espèces ou plus, sur la même surface, pendant une période significative de leur cycle de croissance** (Willey, 1979). Dans les associations de cultures céréale-légumineuse, les espèces associées établissent des interactions négatives (compétition) ou positives (**facilitation et complémentarité de niche**) pour exploiter les ressources du milieu. Les légumineuses établissent des relations symbiotiques avec des microorganismes du sol de la famille des rhizobiums qui sont capables de fixer l'azote atmosphérique grâce aux nodosité des racines et ainsi d'apporter à la plante une grande partie de ses besoins en azote. Cette faculté, qui est propre aux légumineuses, leur confère lorsqu'elles sont associées à des espèces non fixatrices d'azote comme les céréales la possibilité de mettre en jeu un processus de complémentarité de niche pour l'azote du milieu.



Les associations de cultures sont utilisées depuis l'aube de l'agriculture mais elles ont progressivement disparu avec l'intensification des agro-écosystèmes, durant le 20^{ème} siècle, au profit de systèmes fondés sur des peuplements cultivés monospécifiques. Ces systèmes sont actuellement remis en cause avec l'émergence des préoccupations d'économie d'intrants, la nécessité d'améliorer l'efficience des facteurs de production et de préserver l'environnement et la biodiversité. En France, on estime à seulement 50 000 hectares la surface des associations céréale-légumineuse. Elles sont principalement destinées à l'auto-consommation dans les élevages en agriculture biologique.

La performance des associations de cultures est généralement évaluée par :

- Le rendement, la biomasse
- La qualité (taux protéique,...)
- **Le LER = Land Equivalent Ratio**



Le LER permet d'évaluer l'efficacité de l'association au cours de son cycle de développement. Il compare les rendements des cultures associées avec les rendements des cultures seules. Le LER correspond à la surface de cultures monospécifiques nécessaire pour obtenir le même rendement qu'en association. Il se calcule de la manière suivante :

$$LER = \frac{\text{rendement céréale associée}}{\text{rendement céréale seule}} + \frac{\text{rendement légumineuse associée}}{\text{rendement légumineuse seule}}$$

Si $LER=1$, il n'y a aucune différence entre les deux modes de culture
Si $LER<1$, il y a une perte de rendement en association
Si $LER >1$, il y a un avantage productif des associations

PerfCom est un projet financé dans le cadre du Programme **Systerra** de l'**Agence Nationale de la Recherche (ANR)** qui a regroupé 8 partenaires de la recherche agro-écologique et du développement agronomique pour une durée de 4 ans (Novembre 2008 – Octobre 2012). L'ambition de PerfCom était de comprendre le fonctionnement et concevoir des agro-écosystèmes fondés sur des **peuplements complexes**, associant plusieurs espèces (blé dur et légumineuse) ou variétés de blé dur dans une même parcelle agricole, en vue de mieux exploiter les processus écologiques et ressources du sol, notamment azote et phosphore, en vue de **réduire l'utilisation des intrants** fertilisants. Les recherches mises en œuvre ont fait appel à des expérimentations en conditions contrôlées de laboratoire, au champ en station expérimentale et en réseaux de parcelles d'agriculteurs en Camargue et Pays Cathare (agro-écosystèmes innovants à faibles intrants, en agriculture conventionnelle ou biologique), au travers d'une **démarche participative**. Les cultures retenues pour être testées sont la féverole, le pois protéagineux et le pois chiche ainsi que plusieurs variétés de blé dur.

Les objectifs du projet PerfCom sont de : (i) comprendre les relations agro-écologiques des associations de culture blé dur-légumineuse, (ii) de comprendre l'insertion de ces systèmes dans la logique exploitation-filière-région et (iii) d'identifier les freins et les opportunités pour développer de telles associations de cultures.

Le projet est au carrefour de disciplines avec des approches allant de holistique, systémique à réductionniste, des approches expérimentales selon un gradient de contrôle des conditions biophysiques. Nous distinguons trois niveaux principaux d'approche, le long de ce gradient de contrôle des contraintes biophysiques :

- Niveau 1 : évaluation en réseaux de parcelles paysannes (en Camargue et Pays Cathare)
- Niveau 2 : évaluation en parcelles expérimentales à l'INRA Mauguio/Toulouse (station expérimentale) + essais ARVALIS
- Niveau 3 : évaluation en mésocosmes (dans des conditions contrôlées en serre / en chambre de culture)

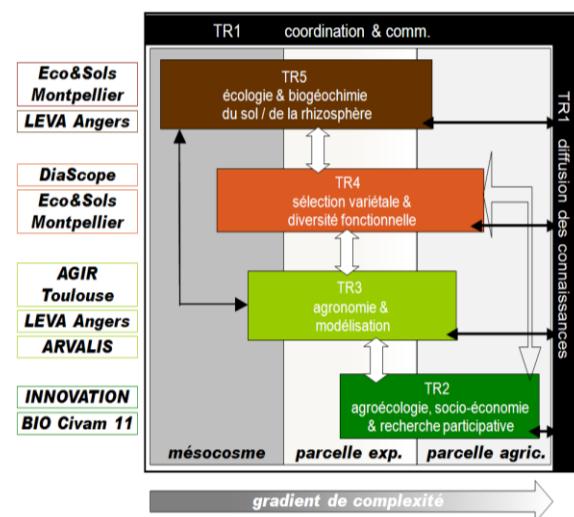


Figure 1 : diagramme du projet PerfCom

PerfCom était organisé en 5 Thèmes de Recherche (TRs) comptant chacun 2 tâches :

- TR1** : Coordination et animation (Tâche 0) – Diffusion et apprentissage des savoirs (Tâche 1)
- TR2** : Agro-écologie et recherche participative
 - Cultures associées possibles (Tâche 2)
 - Test de communautés de culture (Tâche 3)
- TR3** : Agronomie des communautés végétales et modélisation
 - Performances agronomiques (Tâche 4)
 - Modélisation agronomique (Tâche 5)
- TR4** : Génétique végétale et diversité fonctionnelle des plantes et organismes du sol
 - Traits pour l'efficience de l'azote et du phosphore dans les génotypes (Tâche 6)
 - Diversité fonctionnelle du sol (Tâche 7)
- TR5** : Ecologie et bio-géochimie du sol – mécanismes et facilitation N et P
 - Mécanismes de facilitation azotée dans la rhizosphère (Tâche 8)
 - Mécanismes de facilitation phosphorique dans la rhizosphère (Tâche 9)

Réseau d'agriculteurs

Essais dans le Lauraguais (en agriculture biologique)

Dans le cadre du projet ANR PerfCom, un **réseau de parcelles** a été mis en place au cours des campagnes 2008-2009 et 2009-2010 chez 11 agriculteurs (7 en 2008-2009 et 8 en 2009-2010) répartis sur 3 départements (Aude, Gers et Haute-Garonne). Différentes espèces ont été testées : à savoir, le **blé dur** avec la **féverole** (5 essais en 2008-2009 et 3 en 2009-2010) ou le **pois d'hiver** (3 essais en 2008-2009 et 3 essais en 2009-2010) et le blé tendre avec le pois d'hiver (4 essais en 2010).



Sur chaque exploitation nous avons comparé 3 modalités : (i) la céréale cultivée seule (380 grains/m²), (ii) la légumineuse cultivée seule (90 grains/m² pour le pois et 30 grains/m² pour la féverole) et (iii) l'association des deux espèces (220 et 65 grains /m² respectivement pour le blé et le pois et 250 et 15 grains/m² respectivement pour le blé et la féverole).

Les objectifs de ces essais étaient tout d'abord d'évaluer les performances agronomique, économique et environnementale des cultures associées en agriculture biologique et de vérifier leur faisabilité technique dans des conditions réelles sur des parcelles de taille suffisante (12 m x 50 m) pour l'utilisation du matériel agricole.

En 2009-2010, des parcelles de plus grande taille (> 1 ha) ont été implantées sur 3 modalités (blé dur – pois, blé dur – féverole et blé tendre – pois) afin d'évaluer la **possibilité de séparer les grains des deux espèces à la coopérative AgriBio Union**.

Au cours des campagnes, nous avons réalisé un certain nombre de mesures comme la teneur en azote minéral dans les sols au semis (0-120 cm), la **biomasse et la teneur en azote des cultures** à différents stades de développement, l'observation des facteurs biotiques (maladies, ravageurs, adventices), les **composantes du rendement**, la **teneur en protéines** et le taux de mitadin des grains de blé dur à la récolte.

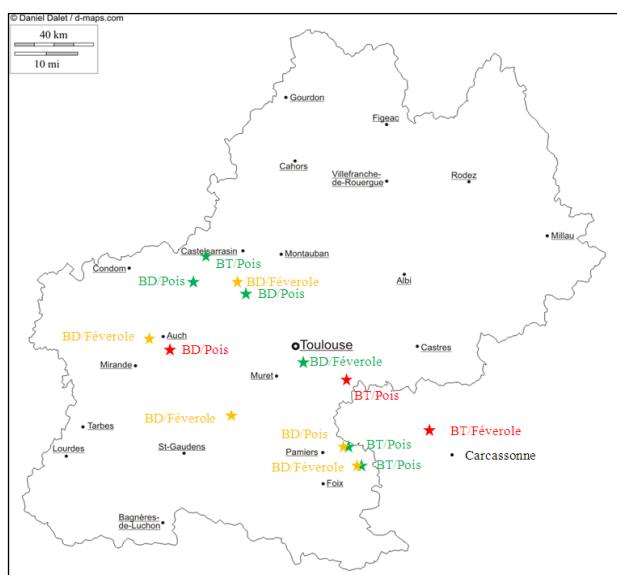


Figure 2 : carte des différents essais implantés sur un réseau de parcelles en AB en Aude, Gers et Haute-Garonne

Légende :

Réseau 2009
Réseau 2010,
Essais grandeur
nature

BT = blé tendre
BD = blé dur

Réseau d'agriculteurs

Essais en Camargue (recherche participative)

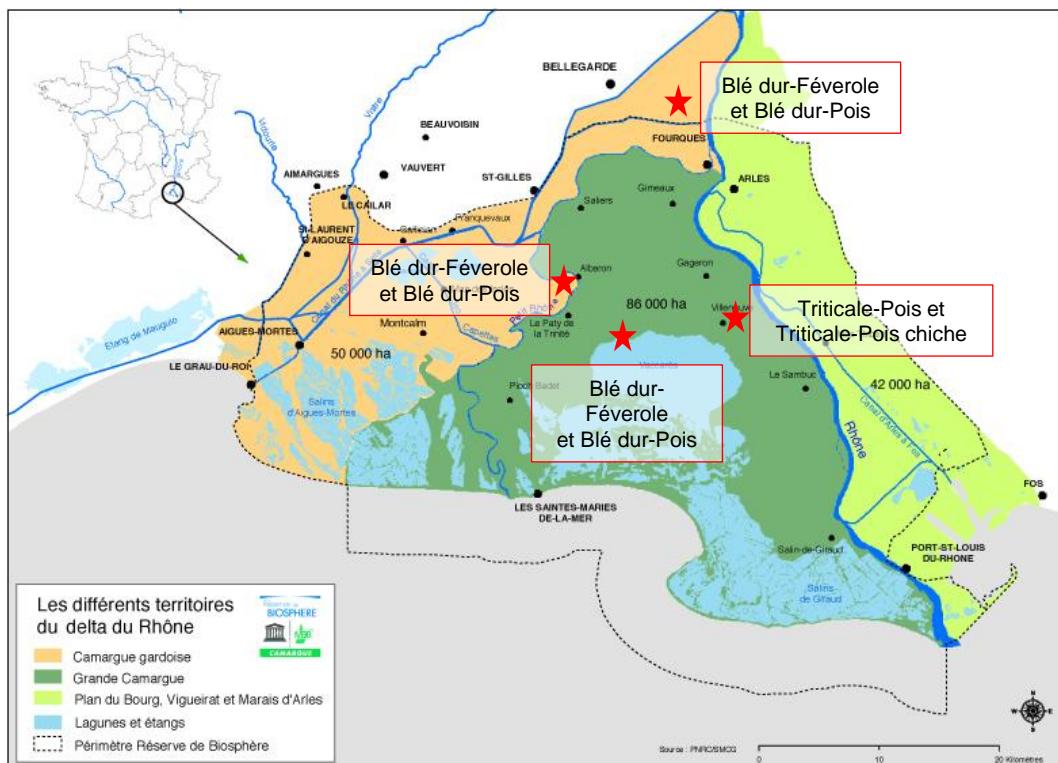


En **Camargue**, 34 essais de cultures associées ont été mis en place dans un cadre de **recherche participative** au cours des campagnes 2009-2010 (17) et 2010-2011 (17) chez 4 agriculteurs :

- 1 agriculteur pratiquant des cultures sans labour
- 1 agriculteur en agriculture biologique
- 1 agriculteur spécialisé dans la production de céréales
- 1 agriculteur en polyculture-élevage

Les objectifs de ces essais furent d'évaluer les **performances agronomiques et économiques des associations de cultures céréale-légumineuse** et de vérifier leur **faisabilité technique dans des conditions réelles** sur des parcelles de taille suffisante (12 m x 50 m) pour l'utilisation du matériel agricole.

Les essais incluaient les associations de cultures et leur équivalent en culture pure (monospécifique) pour les espèces suivantes, choisies par les agriculteurs eux-mêmes : **blé dur** (23), orge (6), ou triticale (5) associés à du **pois** (18), **féverole** (10), **pois chiche** (4) ou **luzerne** (2). Ont aussi été testée **différents niveaux de fertilisation**, et différents modalités, dates et densités, de semis. Au cours des campagnes, nous avons réalisé des mesures de biomasse, du rendement et de ces composantes. Il s'agissait d'**essais participatifs dans lesquels les agriculteurs pouvaient partager leurs impressions et points de vue**.



Réseau d'essais expérimentaux

Dispositifs expérimentaux à Rabastens et Aurade

Dans le cadre du projet PerfCom, les équipes ARVALIS-Institut du végétal ont conduit deux expérimentations, une lors de la campagne 2009-2010 et l'autre lors de la campagne 2010-2011.



Leurs objectifs étaient d'évaluer l'intérêt d'**associations blé dur-légumineuse en situations différenciées de fournitures en phosphore (P)**, et d'enrichir le référentiel général des performances de ce type d'associations. Elles ont consisté en la comparaison de deux types d'associations (**blé dur – pois d'hiver** et **blé dur – pois chiche**) et des cultures pures (monospécifiques) correspondantes sous **différentes doses d'apports d'engrais phosphatés** sur un sol moyennement à peu pourvu en phosphore (figure 4). La production des cultures ainsi que les exportations en N et P ont été mesurées. L'essai de Rabastens (Tarn /2009-2010) a été implanté sur un limon argileux (« Boulbène »). Les conditions de culture (notamment l'excès d'eau hivernal) ont sérieusement compromis le développement du pois chiche rendant les modalités correspondantes inexploitables. L'essai d'Aurade (Gers /2010-2011) a été implanté sur un sol argilo-limoneux. Un fort déficit hydrique a affecté la production de l'ensemble des cultures, mais c'est la production de pois d'hiver qui a été la plus affectée.

	Rabastens (Tarn) 2009-2010	Aurade (Gers) 2010-2011
Sol	Limon argileux (Boulbène) pHeau = 6.3 – P_2O_5 Olsen = 42 ppm	Argile limono-sableuse pHeau = 8.2 – P_2O_5 Olsen = 24 ppm
Modalités testées	Courbes de réponses au phosphore (0-30-60-90 kg P_2O_5 /ha) apporté sous forme de SUPER 45 en pré-semis. 5 modalités d'association (% densité de semis) : <ul style="list-style-type: none">• Blé dur d'hiver en culture monospécifique (100)• Pois d'hiver en culture monospécifique (100)• Pois chiche en culture monospécifique (100)• Blé dur d'hiver associé au Pois d'Hiver (50-50)• Blé dur d'hiver associé au Pois chiche (50-100)	
Variétés, dates de semis, dates de récoltes	Blé dur Dakter, Pois Lucy, Pois-chiche Elmo semés le 18/11/2009, récoltés les 28/06/10, 09/07/10 et 20/07/10	Blé dur Pescadou, Pois Lucy, Pois-chiche Elmo semés le 30/11/2010, récoltés le 05/07/11

Figure 4 : caractéristiques générales des essais

Performances agronomiques

Génétique végétale et diversité fonctionnelle des plantes

L'efficience d'utilisation de l'azote (NUE), de même que l'efficience d'utilisation du Phosphore (PUE) correspondent au rendement en grain par unité d'azote ou de phosphore (provenant du sol et/ou de l'apport d'engrais). Cette définition s'applique aussi bien en conditions de faible quantité d'azote qu'en quantité élevée d'azote dans le sol.

L'efficience d'utilisation peut se décomposer en deux composantes :

- l'absorption : capacité de la plante à extraire l'azote (N) ou le phosphore (P) du sol
- l'efficacité d'utilisation : capacité de la plante à convertir le N ou le P absorbé en rendement de grain

$$\text{NUE ou PUE} = \text{Efficacité d'absorption} \times \text{Efficacité d'utilisation}$$

Depuis le néolithique où les premiers blés (*Triticum t. dicoccum*) ont été domestiqués à partir de l'espèce sauvage (*Triticum t. dicoccoides*), l'**histoire du blé dur** a été riche en événements de diversification et de sélection pour arriver à la sous-espèce cultivée aujourd'hui en Europe (*Triticum t. durum*). Cette histoire évolutive a permis l'émergence de nombreuses sous-espèces qui sont conservées dans les collections de l'Inra.

La sélection au cours du temps a-t-elle eu un impact sur l'efficience d'utilisation de l'azote et du phosphore ? Pour répondre à cette question, 600 variétés du genre *Triticum* ont été étudiées dans des conditions de fortes contraintes azotées et 50 ont été retenues pour une étude plus approfondie permettant d'apprécier leur efficience d'utilisation de N ou de P.

Il ressort de cette étude que **les variétés actuelles de blés durs sont plus efficientes à utiliser l'azote que les variétés ancestrales** (tableau ci-dessous) et ceci, d'autant plus que l'azote est limitant.

Sous-espèce	Index NUE effectif	
<i>aestivum</i> (blé tendre)	5.29	70
<i>turgidum</i>	4.33	60
<i>polonicum</i>	3.9	188
<i>durum</i> (blé dur)	3.72	250
<i>carthlicum</i>	3.65	60
<i>dicoccum</i>	3.34	60
<i>dicoccoides</i>	2.63	29

Il y a une forte diversité des réponses des variétés de blés durs à l'association, comme le montre le graphique ci-dessous représentant les différences de rendement de 7 variétés de blés durs lorsqu'elles sont cultivées en culture pure ou associée à la lentille. Pour 2 variétés (n 1 et n 1823),

l'association avec la lentille permet d'accroître le rendement de 3 à 5 qx/ha, alors que pour les autres, l'association est défavorable .

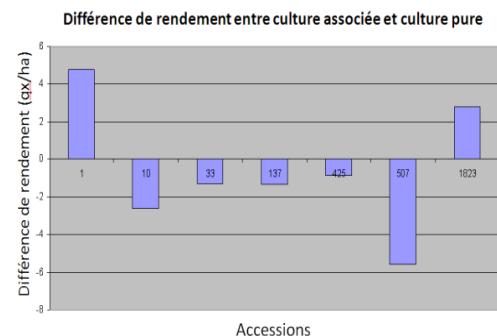


Figure 5 : Graphique de la diversité des réponses à l'association blé dur-lentille (différence de rendement en qx/ha)

La génétique d'association permet de repérer rapidement les régions du génome gouvernant des caractères complexes, en « associant » statistiquement les variations des caractères (phénotypes) aux variations de l'ADN (génotypes).

Si un gène est responsable d'un caractère, on s'attend à ce que différentes formes de ce gène (polymorphisme allélique) entraînent l'expression de différentes formes de ce caractère.

L'étude de la diversité génétique par des marqueurs moléculaires (Diversity Array technology = DArT) a été corrélée à des caractères impliqués dans l'efficience d'utilisation de N et de P. Pour certains marqueurs, la corrélation est très correcte et permet de mettre en évidence des zones du génome impliqués dans l'expression de ces caractères. Il est possible de séquencer les DArT, pour préciser les gènes sous-jacents.

Performances agronomiques

Effet des associations de cultures sur la teneur en protéines du blé



Les différentes associations testées ont permis d'améliorer la teneur en protéines de la céréale comparativement aux cultures « pures » de blé dur ayant reçu le même niveau de fertilisation (figure 6).

Ces résultats s'expliquent essentiellement par deux facteurs :

1) une diminution de la production du blé dur dans les associations par rapport aux cultures « pures », aussi bien dans le cas des mélanges avec le pois d'hiver qu'avec la féverole d'hiver

2) une disponibilité en azote minéral du sol quasi identique pour la céréale en association par rapport à la culture « pure » du fait que la nutrition azotée de la légumineuse en association repose essentiellement sur la fixation symbiotique (en moyenne 85% contre seulement 60% en culture « pure »).

Il est à noter que l'augmentation de la teneur en protéines du blé en association est d'autant plus forte que sa teneur en protéines en culture « pure » est basse.

Cela confirme une fois de plus l'intérêt des associations dans les systèmes à bas intrants azotés pour lesquels la teneur en protéines du blé dur est a priori plus faible.

Dès lors, plus la compétitivité de la céréale est élevée (ou celle de la légumineuse faible) moins la perte de rendement du blé et donc l'augmentation de sa teneur en protéines seront importantes.

Cela indique que c'est le rapport de compétition entre le blé et la légumineuse, modifié par la fertilisation azotée, la densité et la structure du couvert, qui va déterminer le rendement de chacune des deux espèces et donc l'amélioration ou non de la teneur en protéines de la céréale.

Enfin, cette amélioration dépend de la variété à savoir que plus la variété possède une teneur en protéines élevée en condition de culture « pure » moins l'association aura d'intérêt pour en améliorer la qualité, et inversement.

Nos résultats ont montré que la hauteur, la biomasse des tiges et leur nombre sont des critères variétaux importants pour caractériser la compétitivité du blé dur.

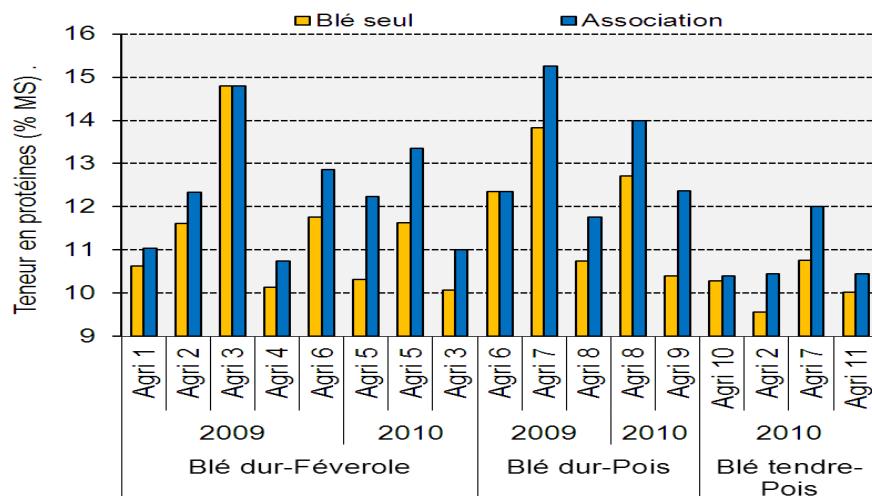


Figure 6 : Teneur en protéines des différentes associations et du blé seul

Contact : Laurent Bedoussac, laurent.bedoussac@toulouse.inra.fr

Performances agronomiques

Les associations de cultures pour accroître les rendements ?

Sur l'ensemble des expérimentations conduites dans le Lauragais, les **rendements des associations sont systématiquement supérieurs ou égaux au rendements moyens des cultures «pures»** aussi bien dans le cas des mélanges blé dur-pois d'hiver, blé dur-féverole d'hiver que blé tendre-pois d'hiver, indiquant ainsi une **meilleure efficacité des mélanges plurispecifiques pour l'utilisation des ressources du milieu** (eau, lumière et nutriments dont l'azote) et confirmant l'intérêt de ces systèmes pour améliorer la productivité agricole (figure 7).

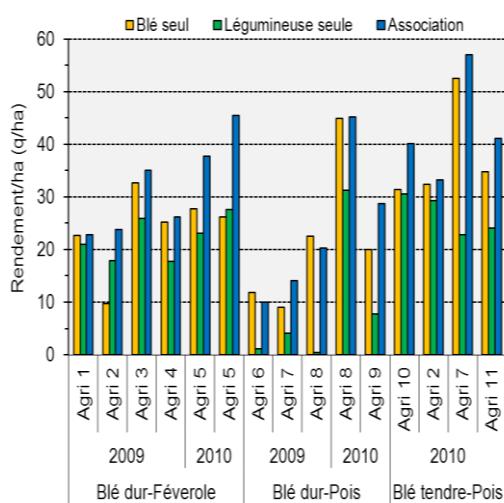


Figure 7 : rendements par hectare des différentes associations de cultures

Pour autant, la **performance des associations tend à diminuer avec la disponibilité en azote** et plus précisément avec la disponibilité précoce en azote. En effet, dans les situations où la disponibilité en azote est élevée la production de la légumineuse est fortement diminuée alors que celle de la céréale n'est que faiblement augmentée. Cela confirme donc que les mélanges blé-légumineuse à graines sont clairement plus adaptés aux systèmes à bas niveaux d'azote (figure 8).

Les résultats des expérimentations menées sur les associations blé dur-féverole d'hiver ont permis de montrer que leur performance dépendait en grande partie des

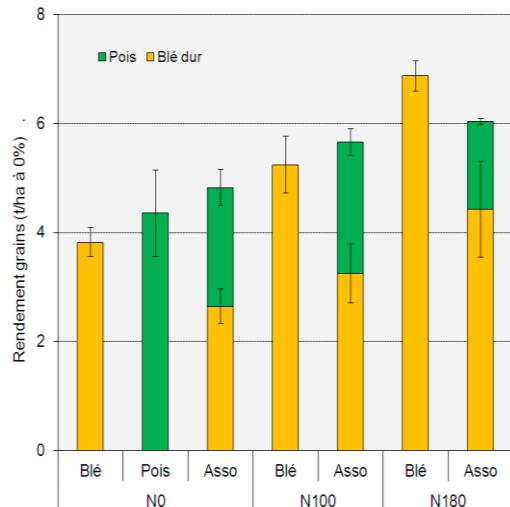


Figure 8 : rendements grains du blé, du pois et de l'association blé-pois en fonction des apports d'azote

densités des espèces dans le mélange.

En effet, ces mélanges présentent une efficacité supérieure aux cultures «pures» lorsque la densité de la féverole d'hiver n'est pas excessive (de l'ordre de 12 plantes m^{-2}) et lorsque la densité du blé dur n'est pas trop faible (plus de 110 plantes/ m^{-2}).

Ces conclusions posent donc la question de la bonne gestion des densités dans ces systèmes et en particulier de celle de la féverole puisqu'il suffit de quelques plantes supplémentaires pour réduire fortement la production et le rendement du blé associé.

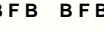
A contrario, nos résultats semblent montrer que le blé dur peut supporter une densité de pois d'hiver supérieure à 50 % de celle des cultures «pures» sans que son rendement ne soit trop réduit suggérant une moindre compétitivité du pois d'hiver comparativement à la féverole vis-à-vis du blé dur.

La **structure du couvert** peut également jouer un rôle similaire, à savoir que les compétitions du blé sur la légumineuse sont accrues dans les espèces sont mélangées sur le rang par rapport aux mélanges en ligne et ceci à densité et fertilisation équivalente.

Performances agronomiques

Conception d'itinéraires techniques pour des associations de cultures

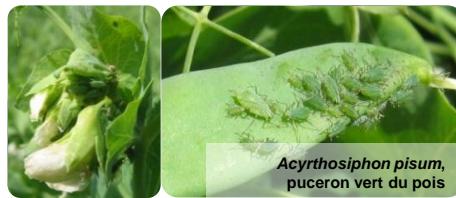
La conception d'itinéraires techniques est complexe puisqu'elle dépend entre autres des contextes pédoclimatiques et des objectifs de production. Les connaissances sont encore insuffisantes pour pouvoir proposer des règles génériques de conception de mélanges d'espèces. Cependant, les travaux réalisés ont permis de valider une démarche de conception de prototypes par «expertise». La démarche est illustrée ici pour le cas où l'objectif principal est d'obtenir un blé dur de qualité technologique satisfaisante et une quantité correcte de grains en système à bas niveau d'azote.

 	<p>Objectif : Produire un mélange avec au moins 50% de blé</p> <p>Conduite et hypothèses : Chaque espèce est semée à 50% de la densité recommandée en culture «pure», en rangs alternés. Il est préférable d'utiliser une variété de blé dur de bonne qualité technologique et relativement compétitive avec un pois protéagineux de type "afila". On optera pour une fertilisation limitée (35-50 kg N.ha⁻¹) et tardive (stade gonflement) pour accroître la qualité du blé dur sans pour autant trop accroître la compétition sur la légumineuse. La protection phytosanitaire pourra se limiter à un traitement de semence et un désherbage chimique en prélevé.</p>
<p>Mélange sur le rang</p>  	<p>Objectif : Produire un mélange avec au moins 50% de blé en réduisant le temps et le coût de semis</p> <p>Conduite : Comme l'itinéraire technique précédent à l'exception du fait que le semis est réalisé en une fois avec un semoir à céréale.</p> <p>Hypothèses : La compétition du blé dur sur le pois d'hiver devrait être plus forte comparativement à l'association en ligne du fait d'une plus grande proximité entre les plantes et donc la part de blé dur dans le mélange devrait être plus grande (à densités comparables).</p>
 	<p>Objectif : Produire un blé dur ayant une très forte teneur en protéines sans apport d'engrais azoté</p> <p>Conduite : Comme le premier itinéraire technique à l'exception du fait que le pois protéagineux est semé à la même densité qu'en culture «pure» et qu'aucun apport d'engrais n'est réalisé.</p> <p>Hypothèses : L'augmentation de la densité de pois d'hiver devrait engendrer un accroissement de la compétition sur le blé dur et donc une diminution importante de son rendement avec en contrepartie un fort accroissement de sa teneur en protéines.</p>
 	<p>Objectif : Produire du blé dur de qualité suffisante sans utilisation d'intrants (engrais et produits phytosanitaires)</p> <p>Conduite : Chaque espèce est semée à 50% de la densité recommandée en culture « pure » en rangs alternés mais en semant la féverole avec un triple inter-rang (58 cm ici) en privilégiant une variété de blé dur de bonne qualité et à paille haute.</p> <p>Hypothèses : La féverole étant plus compétitive que le pois protéagineux elle va fortement réduire le rendement du blé qui ne nécessite donc pas d'apport d'engrais azoté et pour cette raison on la sème sur seulement un rang sur trois.</p>

Performances agronomiques

Effets des associations de cultures sur les bio-agresseurs (pucerons et sitones en AB)

Les données collectées sur le réseau de parcelles en agriculture biologique montrent que les associations sont un moyen efficace de réduire les **populations de pucerons** verts du pois d'hiver par rapport aux cultures pures monospécifiques. Cet effet de la culture associée s'expliquerait par une dilution des ressources, par une augmentation de la distance moyenne à parcourir entre deux plantes hôtes dans les associations et enfin par le rôle de « barrière physique » de la céréale auxquels s'ajoutent une modification de l'aspect général du couvert (forme, couleur, odeur et microclimat). L'ensemble de ces facteurs contribueraient à rendre plus difficile la reconnaissance de la plante hôte et réduiraient à la fois l'installation et la mobilité du puceron dans le couvert, affectant sa dynamique de propagation (figure 9).



A la différence du puceron vert, le **sitone** est capable de reconnaître sa plante hôte à distance et nos résultats semblent indiquer que l'association n'a pas d'effet significatif sur les attaques de sitones (figure 10).

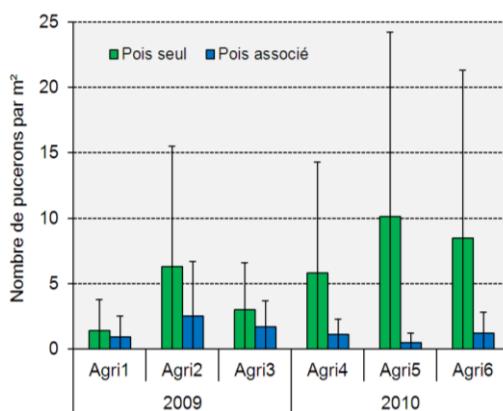


Figure 9 : nombre de pucerons /m² sur la légumineuse seule ou associée



Cependant, nos observations, basées sur l'émergence des jeunes adultes montrent que les effets des associations contre le sitone sont variables. De plus, cette quantification indirecte ne permet pas d'estimer les impacts agronomiques. Il semblerait que cet insecte attaque préférentiellement la féverole d'hiver suggérant une préférence alimentaire pour cette légumineuse. Par ailleurs les attaques sont plus précoces sur le pois d'hiver ce qui pourrait s'expliquer par un décalage de maturité entre ces deux espèces.

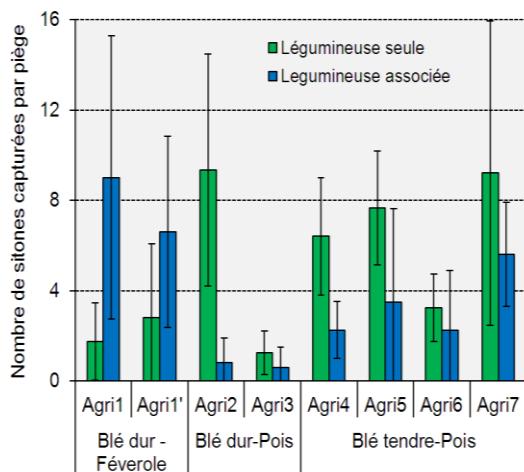


Figure 10 : nombre de Sitones capturées selon les différentes associations

En conclusion, **les associations peuvent présenter un intérêt pour lutter contre certains ravageurs** mais les conclusions ne peuvent être généralisées du fait des mécanismes propres à chaque ravageur.

Performances agronomiques

Les associations : un moyen de réduire l'enherbement en agriculture biologique ?



Nos résultats indiquent clairement que la **biomasse d'adventices** dans les associations blé dur-pois d'hiver et blé-féverole est réduite par rapport aux cultures pures (monospécifiques) de légumineuses, mais comparable par rapport aux cultures pures de céréales (figure 11). Cela suggère que c'est la présence et la quantité de blé dur présente dans le mélange plus que la biomasse totale de l'association qui détermine la quantité d'**adventices**.

Cette **efficacité des associations pour réduire l'enherbement** s'explique par une moindre disponibilité en lumière, eau et éléments minéraux pour les adventices et ce tout particulièrement en début de cycle, lorsque la légumineuse n'est que faiblement développée.

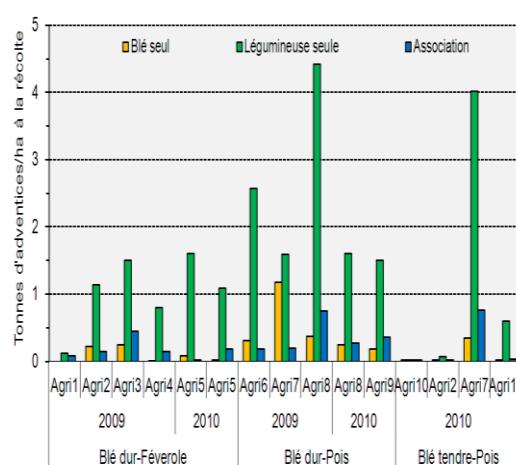


Figure 11 : biomasse d'adventices à la récolte selon les différentes associations

Cependant, il est important de noter que les conclusions formulées ici se fondent sur le niveau d'enherbement global sans distinguer les différentes familles d'adventices. Or, il est probable que ces conclusions dépendent des espèces d'adventices présentes et un travail plus approfondi intégrant cette diversité doit être conduit. Malgré tout, ces résultats sont intéressants pour la production de légumineuses et en particulier du pois d'hiver qui sont des cultures peu compétitives et dont les niveaux de production peuvent être fortement réduits par la présence d'adventices en agriculture biologique.

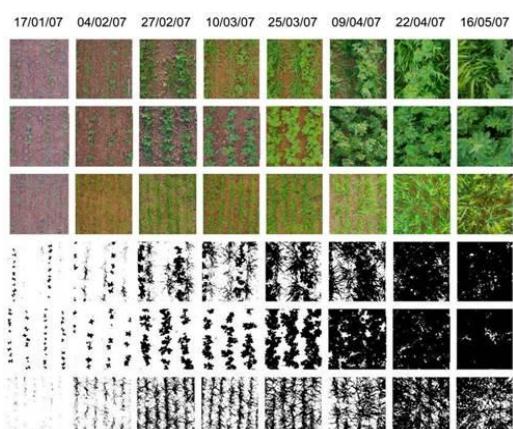


Figure 12 : évolution du taux de couverture de l'association blé dur-féverole (lignes 1 et 4), de la féverole pure (lignes 2 et 5) et du blé dur pur (lignes 3 et 6)

Un autre élément à prendre en considération concerne le **désherbage mécanique des associations d'espèces**. En effet, comme dans le cas des cultures pures, les interventions mécaniques doivent - pour garantir une efficacité maximale - avoir lieu à des stades précoce de développement des adventices, dans des conditions optimales de structure de surface du sol et à des stades où la culture ne sera pas affectée. Les fenêtres climatiques disponibles pour remplir ces conditions sont peu nombreuses et sont d'autant plus réduites dans le cas des cultures associées qu'il faut prendre en compte le développement non pas d'une, mais de deux espèces.

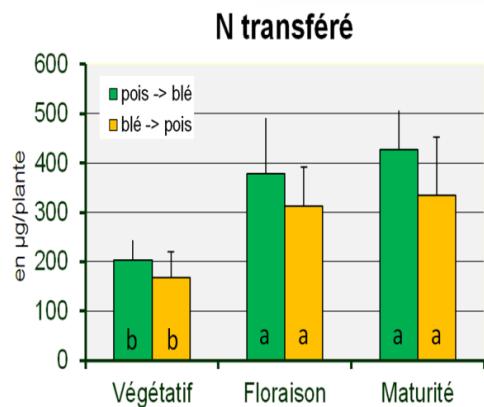
Performances agronomiques

Les transferts d'azote entre légumineuse et céréale

On imagine souvent qu'une quantité importante d'**azote fixé par la légumineuse est transférée à la céréale** pendant le temps de la culture associée, comme cela a été montré dans les prairies semées de ray-grass/trefle. En effet, les légumineuses apportent au sol des composés organiques riches en azote tout au long de leur cycle par leurs racines. On peut supposer qu'une partie de cet azote peut être transférée à la céréale après minéralisation par les microorganismes du sol. La question est de savoir si la durée du cycle d'une culture annuelle est suffisante pour que ces flux d'azote puissent contribuer aux performances agronomiques des céréales associées.



Trois essais installés sous serre, nous ont permis de **quantifier les flux d'azote (N) du pois protéagineux vers le blé dur cultivés en association** dans un même pot. Pour cela avons enrichi des pois ou des blés durs en isotope lourd de N (^{15}N) par un système de perfusion dans la plante, et les transferts de N ont été estimés par mesure de l'enrichissement en ^{15}N du blé dur ou du pois associé. Ces essais ont été effectués avec deux sols contrastés du point de vue de leur texture et de leur concentration en N minéral (sol de l'INRA de Mauguio, 70 mg de nitrate kg^{-1} , et sol sableux du Val de Loire, 8 mg de nitrate kg^{-1}).



Des lettres différentes indiquent une différence significative entre les stades

Figure 14 : quantité d'azote transférée entre pois et blé dur selon leur stade de développement

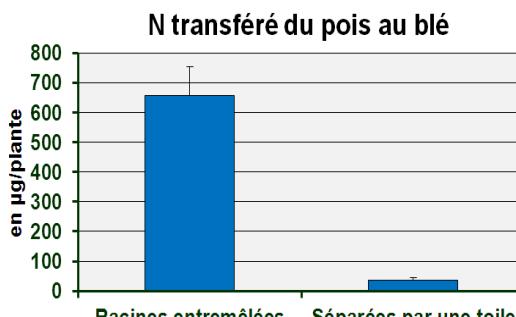


Figure 13 : quantité d'azote transférée du pois au blé

L'enchevêtrement des racines est nécessaire pour favoriser les transferts d'azote entre le pois et le blé. En effet, les transferts sont négligeables lorsque les racines sont séparées par une toile ne laissant pas passer les racines (figure 13). De plus, nous avons pu mettre en évidence une forte corrélation entre la quantité d'azote contenu dans les racines du pois et la quantité d'azote transférée au blé dur.

Au cours de la culture, les transferts du pois au blé dur s'amplifient du stade végétatif à la fin de la floraison du pois, puis se stabilisent jusqu'à maturité de la légumineuse (figure 14). Toutefois, la masse de N transférée reste faible (0,4-0,8 mg/plante), même si elle est un peu plus élevée dans le sol pauvre en nitrate (5 mg/plante) ; elle représente moins de 5% de l'azote total du blé dans nos essais. Cependant, des quantités similaires d'azote sont aussi transférées du blé au pois, et de ce fait, **le bénéfice net de ces transferts pour le blé dur s'avère négligeable**. Ainsi, de bonnes complémentarités, assurant un partage des ressources précoce et efficace contribuent plus au performances de l'association que les transferts d'azote entre plantes.

Performances agronomiques

Complémentarité pour l'azote entre céréale et légumineuse



Les gains de rendement observés dans les associations céréale-légumineuse sont souvent attribués à la **complémentarité des deux espèces dans l'utilisation des ressources azotées**. Les LER calculés sur la quantité d'azote accumulée peuvent atteindre 1,5 pour de faibles disponibilités en N minéral dans le sol (figure 16). La **complémentarité entre les espèces est d'autant plus forte que le milieu est pauvre en N**. Cette meilleure utilisation globale de l'azote contribue aussi à la réduction de la lixiviation et limite la disponibilité en N pour la croissance des adventices.

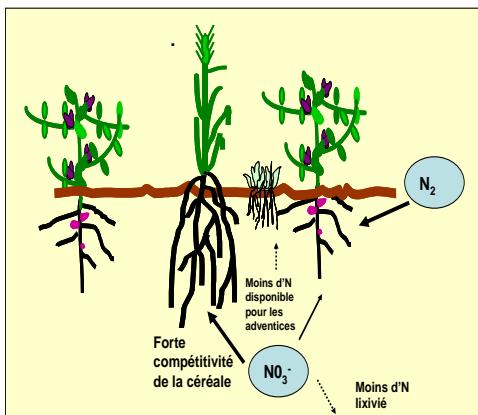


Figure 15 : schéma des transferts d'N entre légumineuse et céréale

La céréale repose uniquement sur l'azote minéral du sol alors que le pois peut aussi assurer une grande partie de ses besoins par la fixation symbiotique de l'azote de l'air. La céréale est plus compétitive que le pois pour prélever l'azote du sol en raison d'une progression racinaire plus rapide et plus dense et surtout en raison d'une demande en azote en début de cycle plus forte. A cause de la forte compétitivité de la céréale pour l'azote du sol, la disponibilité en N minéral pour le pois est plus faible qu'en culture pure ; le pois repose alors davantage sur la fixation symbiotique pour assurer ses besoins (% de N dérivé de la fixation d'azote, %Ndfa) en association avec une céréale qu'en culture pure même lors d'un apport d'azote sur l'association (figure 17).

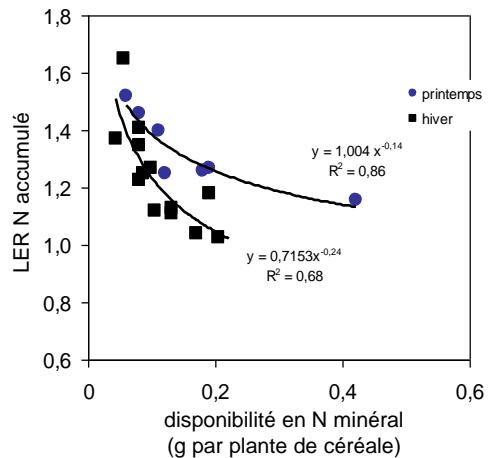


Figure 16 : LER calculés sur la quantité d'N accumulés

Un apport d'azote, en particulier en début de cycle, améliore le statut azoté de la céréale et augmente sa compétitivité pour la lumière. La croissance du pois est alors pénalisée et par conséquent la quantité d'azote atmosphérique fixée est réduite.

La date de l'apport est importante. Un apport d'azote jusqu'au début du remplissage du grain chez le pois est majoritairement valorisé par le blé, espèce ayant la plus forte vitesse de croissance. Dans les deux semaines qui suivent un apport d'azote, la contribution de la fixation symbiotique est affectée mais la capacité de reprise de l'activité des nodosités est ensuite possible quand l'apport a été réalisé pendant la phase végétative ou la floraison alors qu'un apport au début du remplissage des grains précipite l'arrêt de la fixation symbiotique.

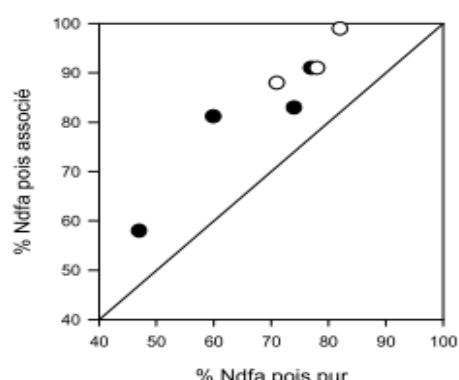


Figure 17 : besoins en N pour pois-orge de printemps (●) pois-blé d'hiver (○)

Performances agronomiques

Facilitation pour le phosphore

La **facilitation** entre deux espèces A et B correspond au cas où leurs **interactions sont positives**, se traduisant par une amélioration de la productivité de l'une ou l'autre espèce, voire des deux, par opposition à la compétition, c'est-à-dire aux interactions négatives entre espèces. Appliquée au partage de ressources du sol telles que le phosphore (P), la facilitation entre les deux espèces associées A et B se produit si une espèce (ici l'espèce B) est capable d'**augmenter la disponibilité de cette ressource dans le sol**, au profit de l'espèce associée (ici l'espèce A). Ce phénomène se produit dès lors que l'espèce B est capable de mobiliser une part du large pool de P non disponible pour l'espèce A (figure 18).

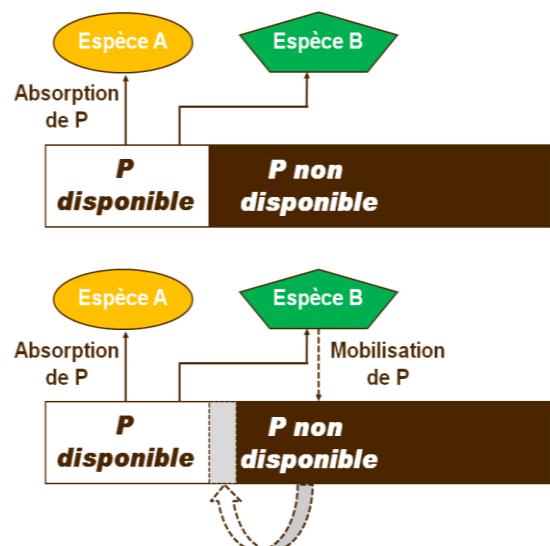


Figure 18 : facilitation pour le phosphore entre deux espèces

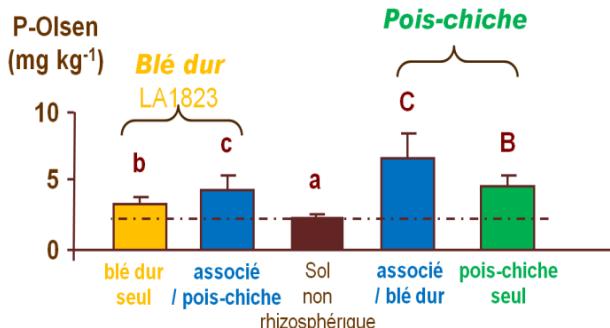


Figure 19: disponibilité du phosphore dans la rhizosphère du blé dur, du pois chiche et de leurs associations

Dans une expérience en pot avec un sol pauvre en P disponible (P Olsen), nous avons observé une **augmentation significative de la disponibilité de P dans la rhizosphère*** du blé dur, plus encore lorsqu'il est cultivé en association avec le pois-chiche. Cette augmentation de la disponibilité de P était plus marquée chez le pois-chiche, et significativement plus lorsque celui était associé au blé dur (figure 19).

Dans cette même expérience en pot, il a été montré que la **croissance du blé dur était améliorée (+17% pour les parties aériennes et +50% pour les racines) en association avec le pois-chiche**, relativement à sa croissance en culture monospécifique. Un tel effet de facilitation n'a cependant été observé que dans le cas du traitement présentant un faible niveau de disponibilité de P.

De tels phénomènes d'augmentation de la disponibilité de P dans la rhizosphère ont été confirmés par la plupart des expériences conduites dans le cadre du projet PerfCom, tant en mésocosmes qu'au champ. Cependant l'effet de facilitation tel que décrit dans l'expérience en pot précédente n'a pu être mis en évidence au champ que dans le seul cas de certains des essais conduits à Auzeville (Toulouse) sur le dispositif longue durée de fertilisation phosphaté, notamment à bas niveaux de disponibilité de P.

Notre hypothèse était que la légumineuse, en fixant l'azote atmosphérique, devait acidifier sa rhizosphère et résulter ainsi en une augmentation de la taille du pool de P disponible (en mobilisant une part de P initialement non disponible), au profit du blé dur cultivé en association. Cette hypothèse n'a pas pu être vérifiée dans le cas du pois-chiche dans l'expérience en pot décrite ci-dessus, ni dans les différents essais au champ. **D'autres processus impliquant les micro-organismes de la rhizosphère et les pools de P organique doivent être impliqués.**

* La rhizosphère est le volume de sol (adhérent) autour des racines qui est soumis à leur influence directe, ou indirecte via les microorganismes.

Performances agronomiques

Valorisation des ressources en phosphore par les cultures associées (1/2)

Les résultats sur la production de grain

Sur l'essai de Rabastens, les apports de phosphore (P) ont eu un léger effet sur la production de grain, notamment sur le blé dur. Le calcul des LER pour les associations blé dur-pois d'hiver indique une mauvaise performance des associations ($LER < 1$) quel que soit le niveau de fourniture en P (figure 20). De tels niveaux bas de LER, assez inhabituels, restent encore à expliquer. Sur l'essai d'Aurade, la production générale est plus faible en raison du stress hydrique intense, et n'est pas influencée par le niveau de fourniture en P. Les LER calculés sur les associations blé dur-pois chiche sont eux par contre supérieurs à 1, sans qu'il soit possible de percevoir un effet des apports de P.

A la vue de ces résultats, il n'est pas possible de discerner un quelconque effet des fournitures différencierées de P sur la production associations blé dur-légumineuse.



Les résultats sur les exportations de phosphore

Concernant les teneurs en P, on constate un enrichissement des grains sous l'effet des apports de P. Le phénomène est très marqué pour l'essai de Rabastens mais beaucoup moins visible sur l'essai d'Aurade. A Rabastens, on constate logiquement une augmentation concomitante des exportations de P dans le grain, sans mettre en évidence un effet synergique des associations sur ce critère.

Malgré les conditions de cultures particulières des expérimentations (mais néanmoins représentatives des situations rencontrées par les agriculteurs du Sud de la France), les deux expérimentations mises en place n'ont pas permis de mettre en évidence un comportement particulier des associations blé dur-légumineuse selon le niveau de disponibilité de P pour les cultures.

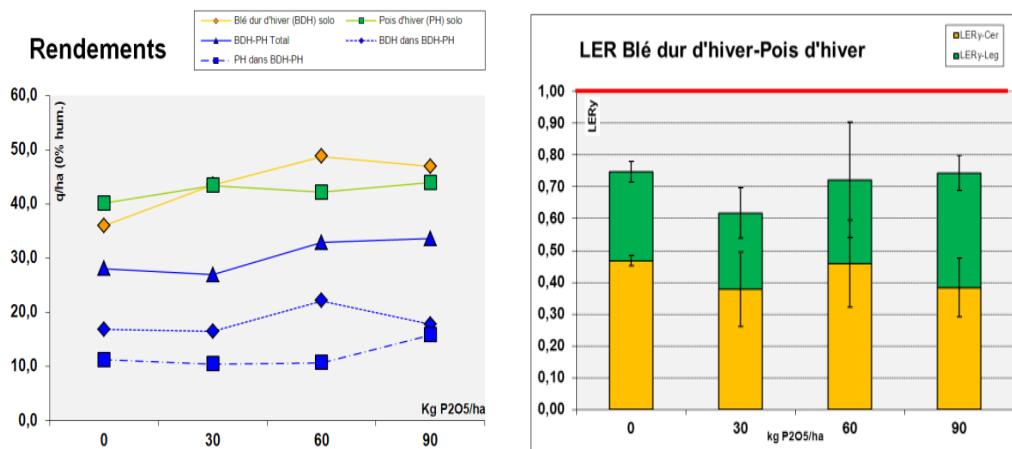


Figure 20 : Réponse aux apports de P de la productivité des cultures, en valeurs absolues et en LER des associations. Essai ARVALIS de Rabastens (81) 2009-2010. ETR des ANOVA (Blé dur d'hiver solo=4.8 q/ha, Pois d'hiver solo=2.5 q/ha, Blé dur d'hiver + Pois d'hiver=4.3 q/ha).

Performances agronomiques

Valorisation des ressources en phosphore par les cultures associées (2/2)



Seul un faible pourcentage du phosphore (P) présent dans le sol est disponible pour la nutrition minérale des plantes. L'essai P longue durée de l'INRA Toulouse, sur lequel 4 niveaux contrastés de P ont été appliqués depuis 40 ans, a été utilisé pour tester l'hypothèse d'une meilleure valorisation du P dans l'association d'hiver blé dur-légumineuse (pois ou féverole) par rapport aux cultures pures.

Nos résultats ont d'abord confirmé que la limitation en P réduit les rendements à la récolte du blé dur et de la légumineuse à la fois en culture pure (monospécifique) et en culture associée, par comparaison avec les situations fertilisées; avec un impact plus négatif dans le cas de l'association (figure 21).

Cela signifie que la **complémentarité fonctionnelle entre le blé dur et la féverole ne suffit pas pour compenser la compétition interspécifique à faible niveau de P**.

Cependant, l'analyse dynamique de la production de biomasse au cours du temps montre que l'association à une efficacité supérieure aux cultures pures pour la

valorisation des ressources du milieu (LER>1) jusqu'au stade de la floraison de la légumineuse, puis décroît fortement ensuite (figure 22).

L'analyse dynamique de l'acquisition du P confirme cette interprétation du fonctionnement de l'association : la **bonne efficacité en début de cycle fait place à une augmentation progressive de la compétition du blé dur sur la féverole dont l'efficacité chute en fin de cycle**.

Plusieurs hypothèses peuvent expliquer l'évolution observée. En début de cycle, soit il n'existe pas de compétition significative pour le P, soit on est en présence d'un véritable phénomène de facilitation. Par la suite, il est probable que la déficience en P ait un impact négatif sur la fixation symbiotique de l'azote par la légumineuse, ce qui aurait deux conséquences : (i) une croissance réduite de la légumineuse, et (ii) une acidification de la rhizosphère insuffisante pour accroître la disponibilité du P pour le blé dur (absence de facilitation).

Ces conclusions, à confirmer sur d'autres types de sols, pointent l'intérêt de l'amélioration variétale pour produire des légumineuses présentant une meilleure efficience d'utilisation du P en présence des microorganismes associés et une meilleure tolérance à la déficience en P.

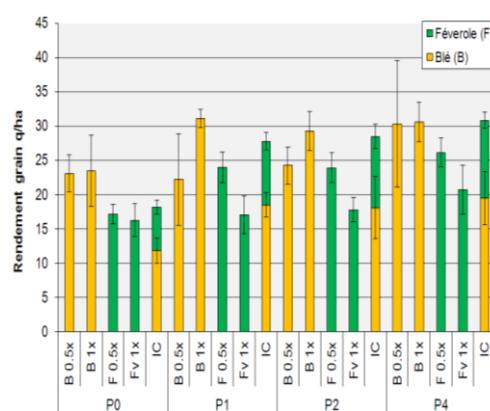


Figure 21 : rendement grain selon les quantités de phosphore apporté

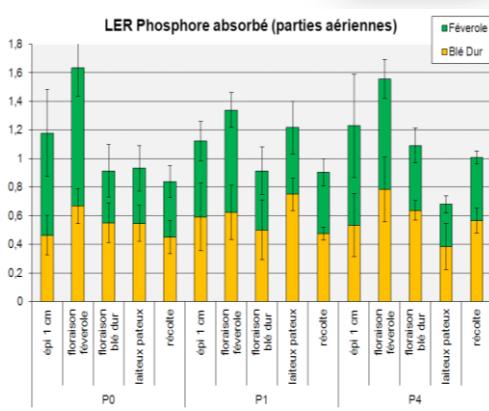
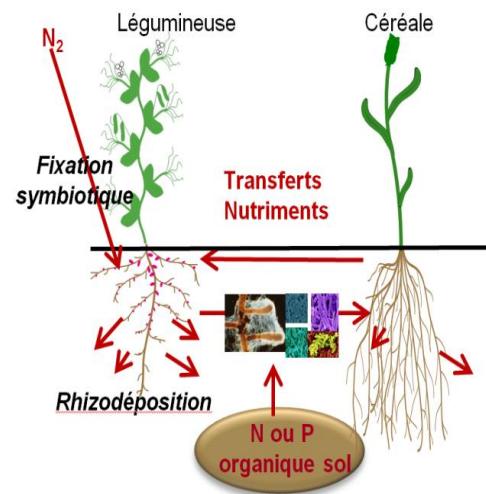


Figure 22 : LER selon les quantités de phosphore apporté

Performances agronomiques

Les communautés microbiennes rhizosphériques

Le volume de sol autour des racines, appelé rhizosphère, est une zone de forte activité microbienne. **Les champignons mycorhiziens** y contribuent, mais également des **bactéries libres** possédant différents métabolismes : par exemple, des organismes **hétérotrophes** qui décomposent la matière organique du sol et minéralisent N et P pour les plantes, des **fixateurs de N** non symbiotiques, et des organismes qui utilisent N dans leurs chaînes respiratoires, **nitrifiants** et **dénitrifiants**. Tous ces organismes forment les **communautés microbiennes rhizosphériques** dont la composition varie selon les espèces végétales et leur phénologie, via la composition des rhizodépôts et le pH de la rhizosphère.



Il était naturel de penser que lorsqu'une céréale et une légumineuse ont leurs racines entremêlées, les communautés microbiennes rhizosphériques de cette association peuvent être différentes de celles trouvées en cultures pures, avec des conséquences sur les transferts de nutriments entre les deux espèces végétales.

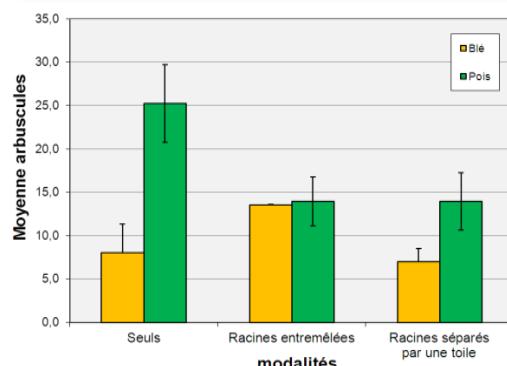


Figure 23 : micorhization selon le milieu

Des essais en pot, dans lesquels les racines du blé et du pois étaient entremêlées ou séparées par une toile, ont montré que l'association avec le blé diminue la **mycorhization** chez le pois (figure 23).

Cependant cette baisse de la **mycorhization** n'a pas eu d'effet sur les transferts de N vers le blé.

Les bactéries hétérotrophes rhizosphériques ont été identifiées chez le blé et le pois en monoculture ou en association à trois stades de développement des plantes (figure 24). Nous avons observé que l'association n'est pas simplement une moyenne des deux communautés rhizosphériques. Elle se caractérise par une chute des taxons connus à l'exception des Actinobactéries qui persistent et deviennent le taxon majoritaire au stade maturité du pois.

La forme filamenteuse d'une majorité de ces bactéries suggère qu'elles jouent un rôle majeur dans les transferts de N entre les racines des deux plantes entremêlées. Leurs capacités de dégradation de composés lignocellulosiques suggèrent également un rôle dans le recyclage des racines mortes et une plus forte sollicitation du compartiment organique du sol.

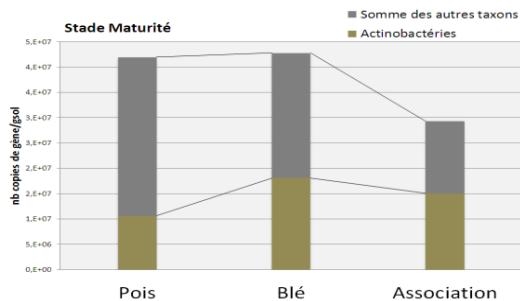


Figure 24 : nombre de copies gènes/g des Actinobactéries et sommes des autres taxons

Au même stade maturité du pois, alors que les transferts de N sont plus intenses entre les deux espèces, on note plutôt une diminution de la capacité de la communauté rhizosphérique à **nitrifier**, ainsi que de l'abondance des communautés de **nitrifiants**. Il se peut donc que les échanges de N à partir de la forme N organique rhizodéposée par le pois se fassent sous la forme NH_4^+ qui est le produit de la minéralisation par les microorganismes, qui serait absorbée par le blé sans passer par la forme NO_3^- .

Performances économiques

La **marge directe**, correspondant au produit de la vente des cultures auquel on ajoute les aides moins les charges opérationnelles et les charges matérielles, est un indicateur adapté pour comparer les performances économiques de systèmes.

La marge directe utilisée ici intègre l'ensemble des opérations réalisées du semis à la récolte en considérant également les apports de fumier réalisés avant le semis et les coûts liés au tri des grains après la récolte. Nous avons considéré un prix de vente de 240 €/t pour les légumineuses et 200 €/t pour le blé dur avec un bonus en fonction de la teneur en protéines (jusqu'à 85€/t pour des teneurs entre 12 et 13.5% et jusqu'à 135 €/t pour des teneurs supérieures à 13.5%).

Deux scénarios ont été comparés, le premier considérant que les cultures associées ne peuvent pas bénéficier des aides compensatoires blé dur et protéagineux (111 et 196 €/ha respectivement) et que le tri (3 passages au trieur rotatif à 10€/t/passage) ne permettrait pas une valorisation en alimentation humaine (déclassement du blé dur à 75% de sa valeur). Le second scénario considère que les associations peuvent bénéficier des aides compensatoires (50%) et peuvent être commercialisées en alimentation humaine (figure25).

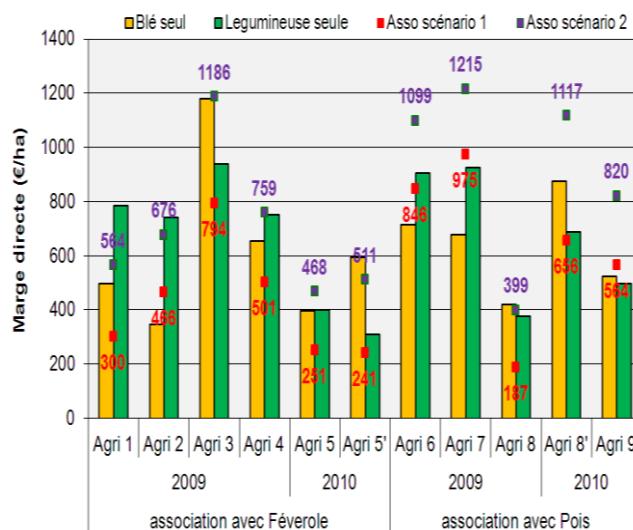


Figure 25 : marge directe par agriculteur

Dans le scénario 1, il est plus intéressant dans 8 cas sur 11 de cultiver 1ha de blé et 1ha de légumineuse que 2ha d'association contre 1 cas sur 11 dans le scénario 2. Ce résultat montre que **les cultures associées peuvent avoir un intérêt économique certain sous réserve qu'elles soient aidées et qu'elles puissent être triées correctement**.

Pour le cas des agriculteurs camarguais, le calcul de la performance économique des associations de cultures, prend en compte les coûts variables de production, les recettes avec les prix courants et le **coût du tri des grains** pour le système «cultures associées». Ainsi, le graphique suivant (figure 26) montre l'absence de différence notable entre «cultures associées» et «culture seule» (monospécifique).

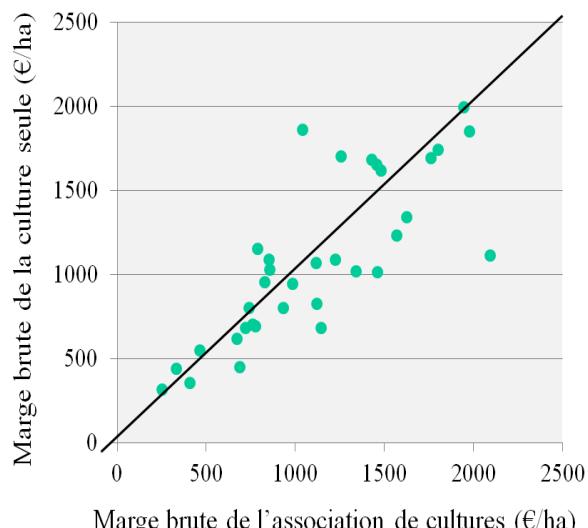


Figure 26 : comparaison des marges brutes de l'association de cultures et de la culture seule

Les cultures associées : une éco-démarche à partager au sein des filières

Une fois récoltées, la céréale et la légumineuse sont séparées et peuvent avoir différentes finalités comme le montre la figure 27.

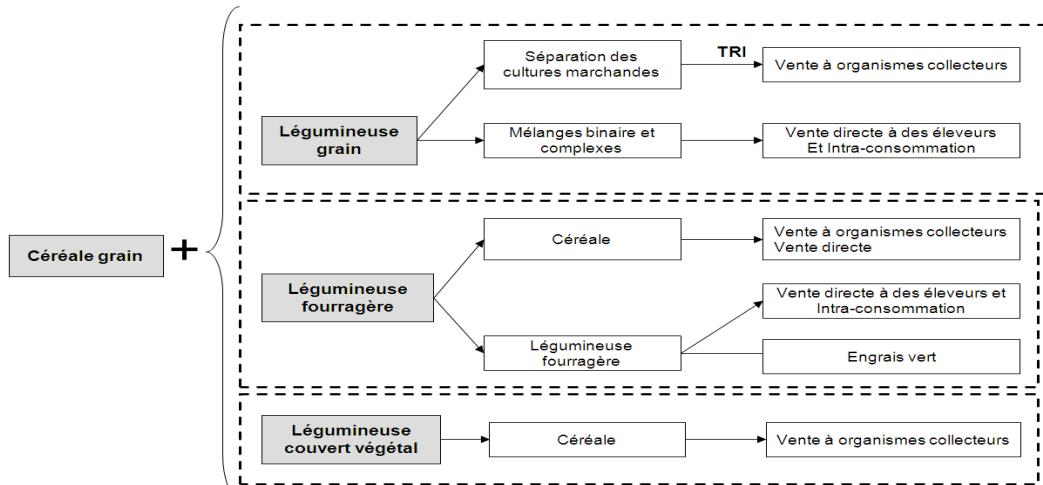


Figure 27 : schéma du devenir des associations de culture

Après tri (figure 28), le blé présente généralement un **taux d'impuretés encore trop élevé** (15%) pour une valorisation en alimentation humaine. Cependant, il est envisageable d'obtenir une qualité suffisante en réduisant la casse des grains à la récolte, en choisissant des variétés ayant des graines de tailles et formes contrastées ou **en utilisant d'autres systèmes de tri**.

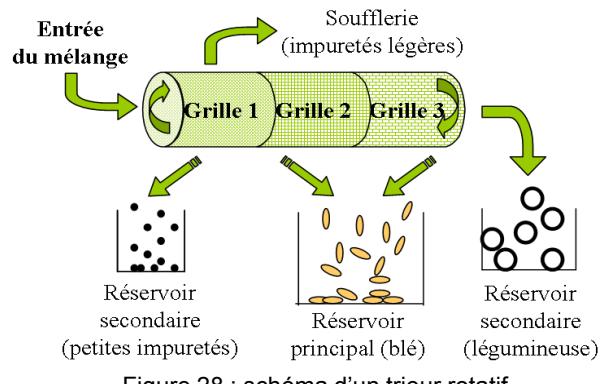


Figure 28 : schéma d'un trieur rotatif

Adaptation des filières à des pratiques agricoles innovantes

L'adoption des cultures associées au niveau des exploitations agricoles peut entraîner des changements importants aux différents maillons de la filière de production, qui nécessiteront des adaptations génératrices à la fois de coûts et de bénéfices. Par exemple, l'**organisation logistique des organismes stockeurs peut être remise en question et nécessiter de nouveaux moyens techniques et organisationnels**, tout particulièrement pour le tri. De plus, si les cultures associées réduisent les besoins en produits phytosanitaires, elles augmentent les besoins de conseil et de pilotage des cultures, et peuvent donc nécessiter chez les organismes coopératifs une réorientation vers une activité de conseil plus spécialisé. Enfin, l'adoption des cultures associées peut aussi être l'occasion pour les transformateurs de développer des produits à plus forte valeur environnementale, de communiquer auprès du consommateur sur ces éco-démarches, et de se différencier de la concurrence pour consolider ou gagner de nouvelles parts de marché. Par conséquent, le point crucial est qu'une **coordination efficace s'établisse le long des filières pour faciliter les processus d'apprentissage liés à ces nouvelles façons de produire, de collecter, de trier**. Pour inciter les acteurs à investir dans ces nouvelles pratiques de production, il est nécessaire que le surplus de valeur ajoutée associée à cette éco-démarche soit partagé aux différents maillons de la filière. Cette coordination aux différents maillons des filières est fondamentale dans une **perspective de déverrouillage du système pour favoriser une transition vers une agriculture plus durable**. Dans ce programme de recherche nous nous sommes interrogés, d'une part, sur la capacité de la filière blé dur à coordonner les différents maillons pour faire circuler suffisamment de valeur ajoutée et de connaissances, et d'autre part, sur la capacité d'adaptation logistique de ses organismes stockeurs.

Filière

La forte segmentation entre l'amont et l'aval de la filière blé dur est-elle un frein à l'adoption des cultures associées* ? L'analyse de la filière blé dur française révèle une absence de liens financiers entre les organismes en charge de la collecte du blé dur et les transformateurs (semouliers-pastiers). Cette forte segmentation entre l'amont agricole et l'aval industriel conduit à des échanges de production de court terme pouvant freiner les investissements et les apprentissages de long terme associés aux choix productifs innovants, tels que les cultures associées. Les incitations à innover sont par ailleurs réduites de par la structure oligopolistique** du marché des semouliers-pastiers. Des stratégies d'éco-labellisation par les pastiers, nécessitant la mise en place de contrats de production spécifiques favorisant des démarches environnementales, pourraient être un moyen d'une meilleure coordination des acteurs en vue de l'adoption de ces pratiques.



Quelle résilience de l'organisation logistique des coopératives ?

Une enquête sur l'**organisation logistique des coopératives agricoles**, collectant et stockant du blé dur a été réalisée auprès de 15 coopératives agricoles de Midi-Pyrénées (figure 29). L'objectif était d'évaluer *ex ante* les caractéristiques de leur structure logistique susceptibles de favoriser l'adoption de pratiques agricoles innovantes, telles que les cultures associées blé dur-légumineuse. Il ressort que les coopératives indiquant que leur logistique serait *a priori* compatible avec ces nouvelles pratiques, sont généralement celles qui sont les plus orientées vers une gestion par la qualité. Cette gestion par la qualité a été appréciée par un score fondé sur les caractéristiques de l'infrastructure logistique et des pratiques de stockage et de tri. L'étape la plus délicate dans la gestion de ces cultures associées étant le tri, la possession de **trieurs performants, densimétriques**, et des marges de manœuvre dans les temps de passage apparaissent comme des conditions importantes dans les déclarations *ex ante* d'acceptation de collecter et de trier ces cultures.

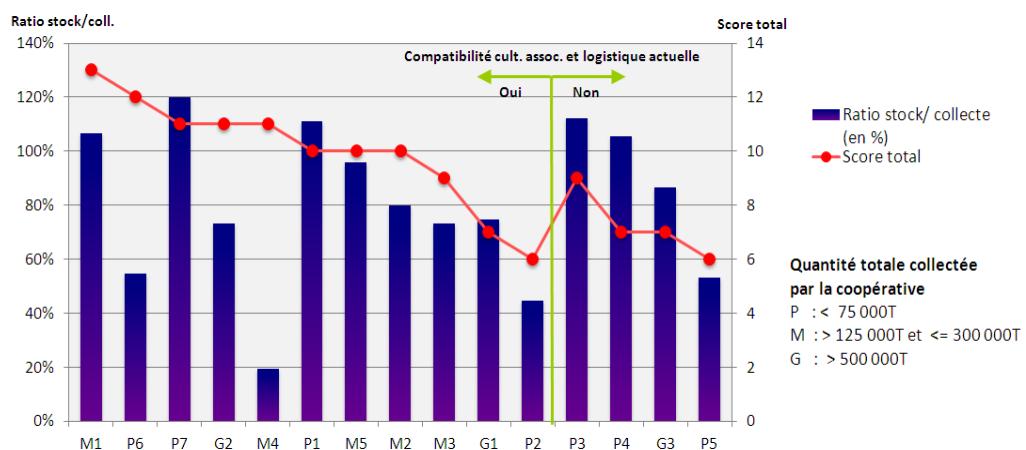


Figure 29 : répartition des coopératives selon leur score et leur acceptabilité logistique « *ex ante* » des cultures associées. (Magrini, Triboulet et Bedoussac.)

* **Source :** Fares M., Magrini M-B., Triboulet P., 2012, « Transition agro-écologique, innovation et effets de verrouillage: le rôle de la structure organisationnelle des filières. », Cahier d'Agricultures, 21(1):34-45

** l'oligopole désigne une forme de marché caractérisé par un faible nombre de vendeurs

Contacts : Marie-Benoit Magrini, marie-benoit.magrini@toulouse.inra.fr
Pierre Triboulet, pierre.triboulet@toulouse.inra.fr
Laurent Bedoussac, laurent.bedoussac@toulouse.inra.fr

Point de vue des acteurs

Les agriculteurs



Les agriculteurs biologiques sont intéressés par les cultures associées pour plusieurs raisons. Tout d'abord, la diversité des assolements et l'allongement des rotations avec introduction d'un maximum de légumineuses et la réduction des intrants sont les principes de base pour maintenir et augmenter la fertilité des sols. De plus, la **fertilisation azotée organique** est **onéreuse en AB** et souvent insuffisamment efficace en cultures d'hiver. Les associations sont un moyen pour diminuer la pression des maladies et des ravageurs contre lesquels ils ne disposent d'aucun moyen efficace de lutte. Elles permettraient de **produire des protéagineux dont les rendements sont bas et moins aléatoires qu'en cultures pures**.

Les agriculteurs reconnaissent aux associations d'autres avantages :

- augmentation des taux de protéines des céréales,
- **meilleure couverture du sol** pour contrôler les adventices,
- **meilleure valorisation des ressources** du milieu (eau, lumière, éléments fertilisants),
- **meilleure stabilité des rendements** face aux aléas climatiques.



Mais il existe des freins au développement des cultures associées dans les exploitations.

A la parcelle :

- difficultés pour trouver des **variétés adaptées** pour les espèces associées,
- dates et techniques de semis parfois différentes,
- interventions pour le désherbage difficiles sur les parcelles,
- dates optimales de récolte des espèces associées ne sont pas les mêmes,
- réglage difficile des moissonneuses.

Dans l'exploitation :

- impact inconnu sur la rotation,
- compositions des mélanges récoltés variables et imprévisibles,
- valorisation des récoltes difficile car collecte pas assurée, livraisons directes limitées en quantité et réservées réglementairement à un rayon limité autour de l'exploitation,
- nécessite un tri et une transformation à la ferme ou l'autoconsommation en élevage.

Politique de soutien pénalisante au niveau de la PAC* :

- statut des cultures associées non défini : déclaration d'une céréale ou d'un protéagineux,
- aides spécifiques recouplées du 1^{er} pilier de la PAC réservées aux cultures pures,
- compositions dans les parcelles imprévisibles : risque de sanctions en cas d'erreur de déclaration,
- absence de soutien spécifique aux associations au niveau du 2^{ème} pilier de la PAC (MAE**).

* Politique Agricole Commune

** Mesures agro-environnementales

Contact : Max Haefliger, biocivam.max@wanadoo.fr

Les collecteurs / prescripteurs

Inconvénients des associations de cultures

- Difficultés pour les techniciens à donner des conseils aux agriculteurs car ils manquent de connaissances sur les associations de cultures notamment dans le choix des variétés, la date de semis, le désherbage mécanique et la récolte où le taux d'humidité des deux espèces doit être le même pour la conservation des grains,
- La coopérative a besoin de sécuriser la conservation des grains biologiques,
- Acceptabilité du produit par les clients,
- La qualité du blé dur est importante pour la filière pastière : pas d'impuretés, taux de protéines doit être à peu près égal à 12%.

Point de vue des acteurs

Quelques cas concrets...

En fonction des objectifs, les principales cultures associées pratiquées sont les suivantes :

Objectifs	Cultures associées pratiquées		Commentaires
Améliorer le taux de protéines du blé meunier ou du blé dur semoulier	Blé tendre ou blé dur associés à des pois protéagineux ou des féveroles		Nécessite du matériel de tri performant sur l'exploitation
Améliorer le taux de protéines d'un mélange de grains de céréales fourragères et de protéagineux	Céréales fourragères (triticale, orge, avoine) associées à des féveroles, à des pois protéagineux ou fourragers ou à des vesces	« Méteils » de plusieurs espèces céréalières et de légumineuses	Majoritairement autoconsommés en élevage ou livrés directement à des éleveurs
Produire du fourrage de cultures annuelles riches en protéines	Céréales fourragères (avoine, triticale) associées à des pois fourragers ou à des vesces		Récolte immature en fourrage enrubanné pour une production abondante et de qualité tout en limitant la fertilisation azotée

Quelques exemples audiois :

Orge/féverole :

Préparation du sol : disques – chisel – semis à la volée – vibroculteur

Semis : 80 kg orge et 120 kg féveroles

Aucun désherbage, aucune fertilisation

Rendement total : 20 – 30 q/ha



Orge/pois :

Préparation du sol : disques – vibroflex – semis en combiné (herse rot / semoir) – rouleau

Semis : 100-130 kg orge, 30-50 kg pois protéagineux

Désherbage : 1 – 2 passages de herse étrille

Fertilisation : 40 kg N organique

Rendement total : 30–40 q/ha

Méteil avoine/orge/vesce d'hiver pour la remise en culture de friches viticoles :

Semis de 80 kg d'orge, 70 kg d'avoine et 50 kg de vesce d'hiver.

Récolte à maturité en 1^{ère} année.

Re-semis spontané de la vesce par égrenage et passage de disques.

Récolte en fourrage ou broyage (engrais vert) en 2^{ème} année.



Quelques exemples camarguais :

Triticale/pois :

Préparation du sol : labour à 25cm puis reprise de labour avec covercrop

Semis : 80 kg triticale et 120 kg pois

Aucun désherbage, aucune fertilisation

Rendements : 22 q/ha de triticale et 12,4 q/ha de pois

Blé dur/féverole :

Préparation du sol : passage de sous-soleuse et labour profond

Semis : 100 kg blé dur et 80 kg féverole (2 lignes de blé pour 1 ligne de féverole)

Fertilisation à 100 kg N + fongicide contre septoriose

Rendements moyens : 34 q/ha de blé dur et 16 q/ha de féverole

Bilan Forum associations de cultures

Lors du forum « Associations de Cultures » organisé le 24 Octobre 2012 à Montpellier SupAgro en clôture du projet PerfCom, des ateliers d'échange se sont déroulés entre des professionnels du secteur agricole, des scientifiques et des étudiants, notamment des spécialisations ASCI (Agronomie et Systèmes de Culture Innovants) et PVD (Production Végétale Durable) de Montpellier SupAgro. Voici les principales informations qui sont ressorties de ces échanges portant sur quatre thèmes différents :

Thème 1 : associations de cultures et maîtrise des bio-agresseurs et des adventices

Pour lutter contre les adventices, le choix des espèces et variétés des cultures associées est important. Les techniques culturales peuvent aussi avoir un impact. Par exemple, le semis à la volée diminue la distance entre les lignes de semis et freine donc le développement des adventices. Contre les bio-agresseurs, le choix de plantes de services peut être judicieux comme dans l'association colza-légumineuse où les sitones n'attaquent plus le colza mais la légumineuse, dont la fonction n'est pas seulement la fourniture d'azote dans ce cas. De plus, un changement (rotation) des associations chaque année évite le retour de bio-agresseurs.

Thème 2 : associations de cultures et maîtrise de la fertilisation

L'intérêt des cultures associées résiderait notamment dans l'effet précédent des résidus de cultures laissés par la légumineuse pour la suite de la rotation. Un tel effet peut toutefois être obtenu plus facilement en culture pure de légumineuse. Selon les quelques agriculteurs présents, l'effet azote de la légumineuse en association paraît moins facile à maîtriser que les engrains azotés qui demeureront toujours la solution de facilité, financièrement accessible. Alternativement, la sélection variétale pourrait améliorer la rhizodéposition des légumineuses ou bien se fonder sur des variétés anciennes de blé moins gourmandes en azote.

Thème 3 : intégration des associations de cultures à l'échelle de l'exploitation agricole

Au niveau socio-économique, les associations de cultures sont difficiles à adopter par les agriculteurs car de nombreuses barrières se placent devant eux. En effet, ils ne bénéficient pas d'aides financières pour les cultiver et le produit est peu valorisé notamment les légumineuses. Cette valorisation pourrait être facilitée en circuit court. Aussi, le mélange céréale-légumineuse est intéressant en tant que fourrage pour le bétail. De plus, il existe une certaine dépendance des agriculteurs vis-à-vis des collecteurs. « Il est difficile de changer quand on est déjà ancré dans un système ». Il existe, par ailleurs à ce jour, un manque de connaissances et de références sur les associations de cultures car trop de facteurs rentrent en jeu.

Thème 4 : développement des associations de cultures à l'échelle de la filière agricole

Tout d'abord, le tri des grains à la récolte de cultures associées à base de blé dur est un frein majeur pour la filière alimentation humaine. En effet, la présence d'impuretés n'est pas tolérée pour la semoulerie. Mais, les cultures associées pourraient en revanche permettre de combler le déficit français en production protéagineuse et favoriseraient l'autonomie des éleveurs au niveau régional. La gestion du stockage pourrait être repensée par les coopératives, par exemple, en se dotant d'un plus grand nombre de silos : les uns servant de stockage temporaire et les autres recevant la récolte triée.

Conclusion et perspectives

Les travaux du projet PerfCom ont permis de mieux comprendre les interactions agro-écologiques au sein d'associations de cultures, d'appréhender l'insertion de ces systèmes dans la logique exploitation-filière-région et d'identifier les freins et les opportunités pour développer des associations de cultures céréale-légumineuse, principalement dans la filière blé dur.

Ainsi ces travaux ont montré que les variétés actuelles de blé dur sont plus efficientes à utiliser l'azote que les variétés ancestrales et notamment lorsque l'azote est limitant. Mais un des freins au développement des cultures associées reste la difficulté pour trouver des variétés adaptées à cette association céréale-légumineuse car elles ont des cycles de culture différents.

Les essais en conditions d'exploitation agricole chez des agriculteurs en AB ont montré, au niveau des performances agronomiques des cultures associées, une amélioration de la qualité du blé (plus de protéines et moins de mitadine), une augmentation du rendement global de grains et une diminution des adventices par rapport aux couverts de légumineuses pures. L'intervention pour le désherbage est difficile et lorsqu'il est mécanique, il doit se faire à des stades précoces de développement des adventices. Pour les agriculteurs, les associations de cultures ont l'avantage de diminuer les intrants et notamment la fertilisation. Les associations de cultures sont un moyen efficace pour réduire la population de pucerons verts du pois d'hiver par rapport aux cultures pures de pois. Par contre, aucun effet significatif des associations sur les attaques de sitones n'a pu être démontré. L'intérêt des cultures associées en terme de maîtrise des bio-agresseurs et des adventices mérite d'être étudié de façon plus approfondie. Notons que la conception d'itinéraires techniques pour les cultures associées reste complexe car elle dépend des contextes pédoclimatiques et des objectifs de production. En outre, la place des associations de cultures dans les rotations reste à approfondir.

Dans le cadre du projet PerfCom, il a été approuvé que la complémentarité entre céréale et légumineuse est d'autant plus forte que le milieu est pauvre en azote. En raison de la forte compétitivité de la céréale pour l'azote du sol, la disponibilité en azote minéral favorise le recours à la fixation symbiotique chez la légumineuse, pour couvrir ses besoins. De plus, l'enchevêtrement des racines entre céréales et légumineuses est nécessaire pour favoriser les transferts d'azote entre les espèces associées, même si ceux-ci restent quantitativement peu important (dans le cas étudié pois – blé dur). C'est avant tout le partage de la ressource (azote du sol pour la céréale, azote de l'air pour la légumineuse) qui explique les bonnes performances des cultures associées (rendement en grain et teneur en protéine de la céréale) à bas niveau d'intrants azotés. Seule une faible proportion de phosphore présent dans le sol est disponible pour la nutrition minérale des plantes. Ainsi, cette limitation en P réduit les rendements à la récolte du blé et de la légumineuse en culture pure par comparaison avec la situation fertilisée. Une bonne efficacité de l'acquisition du P par l'association de culture en début de cycle (facilitation) fait place à une augmentation progressive de la compétition du blé dur sur la féverole en fin de cycle. Il est difficile de distinguer un comportement particulier des associations blé dur – légumineuse selon les niveaux de disponibilité de P dans le sol.

Les cultures associées en AB seraient économiquement plus intéressantes que les cultures pures en l'absence d'apport d'azote organique, si elles sont aidées et sous réserve qu'elles puissent être correctement triées. Mais en conventionnel, l'avantage économique des cultures associées est plus difficile à démontrer. La PAC engendre une politique de soutien pénalisante pour les cultures associées car les aides ne sont réservées que pour les cultures pures.

L'efficacité du tri des céréales et légumineuses semble insuffisante pour s'assurer que le blé dur puisse être commercialisé en alimentation humaine. Il a été noté qu'une coordination efficace doit s'établir le long des filières pour faciliter les processus d'apprentissage liés à ces nouvelles façons de produire, de collecter et de trier. La forte segmentation entre l'amont et l'aval de la filière blé dur est un frein à l'adoption des cultures associées. Ainsi, il faut réfléchir sur des systèmes de tri plus performants car le développement des cultures associées dépend de l'efficacité du tri des graines.

Pour en savoir plus...

Partenaires du projet PerfCom

Inra UMR Eco&Sols

2, place Pierre Viala
34060 MONTPELLIER cedex 2
Philippe HINSINGER,
Jean-Jacques DREVON,
Edith LE CADRE, Claude PLASSARD,
Laurie AMENC, Didier ARNAL,
Jean-Louis AZNAR, Nicole PAOLETTI,
Michaël CLAIROTTTE, Agnès MARTIN,
Philippe DELEPORTE,
Elvire LEGNAME (décédée depuis),
Catherine PERNOT, Gérard SOUCHE,
Hélène VAILHE, Charlène GUILLERE,
Jennifer MARASI, Emilie RUSSELLO,
Elodie BETENCOURT, Nicolas DEVAU,
Marek DUPUTEL, Xiaoyan TANG

IRD UMR Eco&Sols

2, place Pierre Viala
34060 MONTPELLIER cedex 2
Laetitia BERNARD, Alain BRAUMAN,
Eric BLANCHART, Didier BLAVET,
Cathy CLERMONT-DAUPHIN,
Cécile VILLENAVE, Didier BRUNET,
Anne-Laure PABLO, Estelle TOURNIER

Inra UMR AGIR – ENSAT Toulouse

Chemin, de Borde Rouge
Auzeville
31320 CASTANET TOLOSAN
Eric JUSTES, Laurent BEDOUSSAC,
Etienne-Pascal JOURNET,
Jean-Marie NOLOT, Bruno COLOMB,
Mhand FARES, Marie-Benoît MAGRINI,
Patrice ROUET, Didier CHESNEAU,
Patrick PETIBON, Pierre PERRIN,
Maryse PERREU

Inra UMR Innovation – CIRAD

2, place Pierre Viala
34060 MONTPELLIER cedex 2
Santiago LOPEZ-RIDAURA,
Jean-Marc BARBIER, Roy HAMMOND,
Jean-Claude MOURET,
Gaël GOULEVANT, Sarah PEREZ,
Laurence PALVADEAU

Inra UE DIASCOPE

Domaine expérimental de Melgueil
34130 MAUGUIO
Dominique DESCLAUX, Anne
ZANETTO, Jean-Marc EBEL, Thierry
LAPORTE, Bruno LORENTZ, Alain GIL,
Basilé KOFFI

UPR LEVA ESA Angers

55 rue Rabelais
49000 ANGERS
Joëlle FUSTEC, Guenaelle CORRE-
HELLOU, Françoise COSTE, Guillaume
PIVA, Mario CANNAVACCIUOLO,
Nathalie CASSAGNE, Sylvain PINEAU,
Vincent OURY, Philippe MALAGOLI,
Benoît FAYAUD

Biocivam 11 Carcassonne

Chambre d'Agriculture
ZA de Sautès, à Trèbes
11878 CARCASSONNE Cedex 9
Max HAEFLIGER

ARVALIS Institut du végétal

6 Chemin de la Côte Vieille
31450 BAZIEGE
Jean-Pierre COHAN,
Pierre CASTILLON (décédé depuis)

Site internet: www6.montpellier.inra.fr/systerra-perfcom/

Les auteurs de la filière remercient les agriculteurs et l'ensemble des acteurs pour leur collaboration au projet PerfCom