

Est-il possible d'améliorer le rendement et la teneur en protéines du blé en Agriculture Biologique au moyen de cultures intermédiaires ou de cultures associées ?

E. Justes^{1*}, L. Bedoussac¹, L. Prieur²

¹ : INRA, UMR 1248 AGIR, BP 52627, F-31326 Castanet-Tolosan Cedex

² : CREAB Midi-Pyrénées, LEGTA Auch-Beaulieu, F-32020 Auch Cedex

Correspondance : Eric.Justes@toulouse.inra.fr

Produire des rendements de blé réguliers avec une teneur en protéines satisfaisant la mise en marché est un enjeu majeur en AB. Deux systèmes de culture conçus pour une meilleure valorisation des ressources naturelles en azote ont été évalués expérimentalement : i) des cultures intermédiaires ont été semées en été et enfouies avant le semis du blé, ii) le blé a été cultivé en association avec une légumineuse à graines. Les résultats sont encourageants bien que les itinéraires techniques soient encore perfectibles.

Résumé :

L'objectif du travail est de trouver des systèmes de culture durables pour produire en AB des rendements de blé réguliers et de bon niveau avec une teneur en protéines satisfaisante. Notre démarche repose sur une valorisation optimale des ressources naturelles en azote provenant de la minéralisation du sol et de la fixation symbiotique. D'une part, des cultures intermédiaires ont été semées en été et enfouies avant le semis du blé réalisé en novembre afin de limiter les pertes hivernales d'azote nitrique. D'autre part, le blé a été cultivé en association avec une légumineuse à graines (pois ou fèverole d'hiver). Les cultures intermédiaires sont efficaces dans leur rôle de piège à nitrate et permettent d'augmenter le rendement et la teneur en protéines du blé lors des années pluvieuses. En culture associée, le rendement du blé est réduit mais la teneur en protéines est significativement augmentée et le rendement total (blé+légumineuse) est plus élevé. Ainsi, en AB, les cultures associées sont plus efficaces pour utiliser les ressources naturelles en azote. Il reste cependant i) à optimiser les itinéraires techniques de ces systèmes de culture, et, ii) déterminer la place des associations au sein des rotations et analyser leur effet pour la gestion des bioagresseurs.

Mots-clés : azote, culture intermédiaire, culture associée, blé tendre, blé dur, teneur en protéines

Abstract: Is it possible to improve the yield and grain protein concentration of organically-farmed wheat using cover crops or intercrops?

The objective of our work was to investigate innovative sustainable cropping systems to produce regular yields of wheat with a satisfactory grain protein concentration in organic farming systems. Achieving good production levels in stockless French organic farming systems is a major challenge due to strong N limitation. Our approach is mainly based on a better valorisation of the natural nitrogen resources from soil mineralisation and symbiotic fixation of legumes, and not by an increase in the use of organic fertiliser. Two experiments were carried out in southwestern France where winter wheat and durum wheat were grown for their use in human consumption (bread and pasta, respectively). On one hand, cover crops were sown in summer and were incorporated in early November just before the wheat was sown. On the other hand, wheat was cultivated in mixture (intercropping) with a grain legume such as winter pea or fababean. The cover crops were found to be effective in the case of rainy winter years i) because of their role as a nitrate catch crop to mitigate nitrate leaching and ii) because they made it possible to increase the yield and the protein concentration of wheat grains by increasing available N

(role of green manure). In the case of intercropping, wheat yield was reduced in comparison to a wheat crop alone, as expected, but the protein concentration was significantly increased and the whole grain yield (wheat + legume) was increased. Thus, in organic farming, intercrops seem to be more effective for enhancing natural nitrogen resources. However, it is still necessary: (i) to optimise the technical sequences of these two farming systems, and; ii) to determine the role of intercrops within rotations and to analyse their effect for both pests and diseases management, which is crucial in organic farming systems.

Keywords: nitrogen; cover crop; intercrop; winter wheat; durum wheat; grain protein concentration.

Introduction

La commercialisation du blé (blé tendre panifiable ou blé dur) issu de l'Agriculture Biologique (AB) requiert le plus souvent de produire des graines avec une teneur en protéines de bon niveau afin de valoriser correctement la production lors de sa mise en marché. Outre les mauvaises herbes, l'azote est généralement le facteur limitant essentiel du rendement et de la teneur en protéines du blé tendre panifiable (David *et al.*, 2005). Il en est de même pour le blé dur destiné à la semoulerie (Desclaux *et al.*, 2008). Des travaux ont été menés depuis plusieurs années en AB en France pour aider à la gestion de la fertilisation azotée à base d'engrais organique, comme les farines de plumes hydrolysées ou d'autres produits à minéralisation rapide. Ces travaux ont permis la mise au point de règles de décision stratégiques à partir du modèle AZODYN-Org (David *et al.*, 2004 ; 2005). Les apports d'engrais organique ont généralement un effet significatif sur le rendement et/ou la teneur en protéines (David *et al.*, 2004 ; 2005). Néanmoins, les résultats obtenus à la ferme de Beaulieu à Auch (32) par le CREAB Midi-Pyrénées depuis quelques années indiquent que cette efficacité est très variable entre années et produits épandus. Leur valorisation économique est ainsi mal assurée bien que leur prix d'achat ait diminué ces dernières années. Ceci s'explique par la faible efficacité de l'engrais organique dont le niveau se situe généralement entre 15% et 35% (au mieux) dans les conditions pédoclimatiques argilo-calcaires du Sud Ouest de la France (Prieur et Justes, 2006).

Par ailleurs, contrairement à une idée généralement admise, il est possible de perdre de l'azote nitrique par lixiviation hivernale (appelée communément lessivage) en système de culture en AB bien qu'aucun engrais azoté de synthèse ne soit utilisé (Hansen *et al.*, 2000 ; Stopes *et al.*, 2002). Comme l'azote est un facteur limitant de la production et de la qualité du blé, il est nécessaire de réduire autant que possible ces pertes en adaptant le système de culture et notamment en implantant une culture intermédiaire après les cultures d'hiver afin de piéger l'azote minéral du sol provenant de la minéralisation nette en azote du sol pour éviter qu'il ne soit lixivié et donc perdu (Stockdale *et al.*, 2002 ; Watson *et al.*, 2002 ; Prieur et Justes, 2006). L'utilisation de légumineuses fourragères a également l'avantage d'avoir une fonction d'engrais vert même si leur capacité d'absorption d'azote minéral est généralement plus faible que d'autres espèces comme par exemple les crucifères (Mueller et Thorup-Kristensen, 2001).

Une autre voie possible pour améliorer la teneur en protéines des grains de céréale est de les cultiver en association (culture associée) avec une légumineuse à graines (Hauggaard-Nielsen *et al.*, 2001). Ainsi, il a été montré que la teneur en protéines de l'orge de printemps était augmentée lorsqu'elle était cultivée en association avec du pois de printemps en système de culture en AB (Jensen *et al.*, 2006). Un des avantages de ces cultures associées serait également de réduire les attaques de maladies et de ravageurs (Kinane et Lyngkjaer, 2002) ou la présence de mauvaises herbes comparativement au pois (Hauggaard-Nielsen *et al.*, 2001). Toutefois, comme les travaux de recherche ont été

essentiellement réalisés dans les conditions du Nord de l'Europe (notamment au Danemark), peu de références sont disponibles pour des associations de cultures d'hiver, comme le blé tendre ou le blé dur. Enfin, des travaux ont montré l'intérêt des cultures associées pour réduire les pertes de nitrate par rapport à une culture mono-spécifique de légumineuse (Hauggaard-Nielsen *et al.*, 2001 ; 2003).

Notre travail a consisté à évaluer différentes solutions agronomiques autres que la fertilisation azotée organique pour améliorer le rendement et la teneur en protéines des graines de blé. L'objectif est d'évaluer et, si possible, de concevoir des systèmes de culture ayant pour objectif de mieux valoriser les ressources naturelles en azote provenant de la minéralisation en azote des matières organiques humifiées du sol et de la fixation symbiotique des légumineuses. Hormis le choix du précédent cultural, dont il est judicieux qu'il soit une légumineuse (Prieur et Justes, 2006), et la pratique de la fertilisation organique (David *et al.*, 2004 ; 2005), deux types de solutions ont été testées : i) l'utilisation de repousses de féverole et/ou implantation de culture intermédiaire piège à nitrate (moutarde ou vesce/avoine), et ii) la culture du blé en mélange avec une légumineuse à graines (culture associée).

1. Intérêts et limites des cultures intermédiaires

Les cultures intermédiaires (CI) correspondent à des cultures semées après la culture principale de vente et qui sont incorporées avant la culture suivante.

Leur objectif est double : 1) réduire les pertes d'azote nitrique par lixiviation hivernale (effet piège à nitrate), et 2) restituer de l'azote à la culture suivante (effet engrais vert).

Durant trois années, des CI (moutarde ou vesce/avoine) ont été semées fin août après un précédent légumineuse féverole en 2005 et 2006 et lentille en 2007 et ont été incorporées en novembre juste avant le semis du blé tendre à la ferme de Beaulieu en AB (Auch, 32). Le blé suivant a été conduit avec ou sans fertilisation organique de printemps. L'impact des CI sur le rendement et la teneur en protéines a été évaluée en comparaison avec un traitement sans CI semée mais où des repousses spontanées de légumineuse se sont développées.

La croissance rapide des CI réduit le stock d'azote minéral du sol en entrée hiver

Les cultures intermédiaires ont une croissance rapide qui dépend de l'espèce mais surtout du scénario climatique (Figure 1). La production de biomasse a été faible en 2004 alors qu'en 2005 elle a dépassé les 3 t/ha en seulement 2 à 2.5 mois de croissance. La moutarde est plus 'productive' que le mélange vesce-avoine, qui est lui-même plus 'productif' que les repousses de féverole et de lentille, bien que ces deux dernières n'aient été évaluées qu'une seule année.

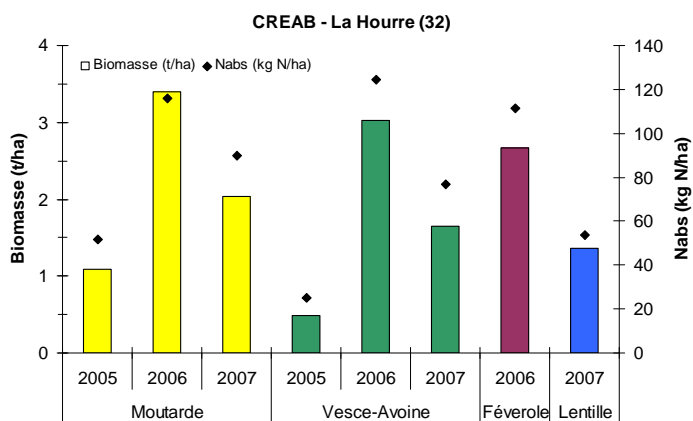


Figure 1 : Biomasse aérienne et quantité d'azote absorbée par différentes cultures intermédiaires après un précédent féverole (2004 et 2005) ou lentille (2006) au CREAB (ferme de Beaulieu en AB, 32).

L'objectif des cultures intermédiaires étant de combiner les effets « piège à nitrate » et « engrais vert » ; il est important de quantifier la biomasse produite mais aussi, et surtout, la quantité d'azote accumulée par les CI avant leur réincorporation. Dans nos essais, les CI ont accumulé de 30 à 120 kg d'N/ha ; la plus forte accumulation a été observée en 2005 et la plus faible en 2004, 2006 étant intermédiaire. La moutarde a la plus forte capacité d'absorption d'azote minéral et d'accumulation en azote, sans doute car son enracinement se projette plus rapidement en profondeur.

Dans l'objectif de réduire les pertes de nitrate par lixiviation (effet « piège à nitrate ») nous avons mesuré les reliquats d'azote minéral à plusieurs dates : en juillet 2004 lors de la récolte de la féverole, en novembre 2004 lors de l'incorporation de la CI et enfin en mars 2005 à la sortie de l'hiver. La Figure 2 montre les résultats obtenus dans trois situations : 1) en absence de CI (0CI) ; 2) avec l'implantation d'une moutarde ou 3) d'un mélange vesce-avoine.

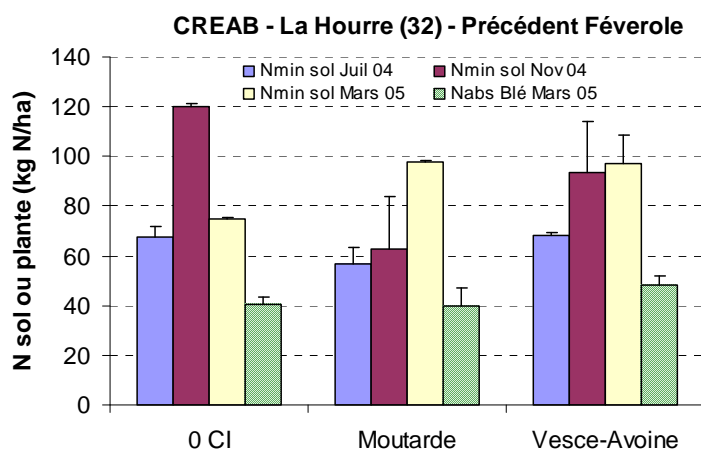


Figure 2 : Reliquats d'azote minéral mesurés en juillet 2004, novembre 2004 et mars 2005 et quantité d'azote absorbée par le blé en mars 2005 après un précédent féverole en fonction de la gestion de l'interculture.

En absence de CI, la quantité d'azote minéral augmente entre juillet et novembre 2004 du fait de la minéralisation nette de l'azote organique du sol et de la décomposition des résidus de récolte puis diminue pendant l'hiver du fait des pertes de nitrate par lixiviation. *A contrario*, avec l'implantation d'une culture intermédiaire de moutarde, le stock d'azote minéral du sol n'évolue pas entre juillet et novembre du fait de l'absorption d'azote minéral par la CI qui a joué un rôle de « piège à nitrate » efficace. Par contre, on observe une augmentation du stock d'azote minéral en sortie hiver qui s'explique par la dégradation rapide de la CI dans le sol après son incorporation et qui permet la libération d'une quantité importante d'azote minéral immédiatement disponible pour le blé. L'utilisation d'un mélange vesce-avoine donne des résultats intermédiaires, à savoir que la quantité d'azote minéral augmente légèrement entre juillet et novembre, du fait de la moindre absorption d'azote minéral de ce mélange par rapport à la moutarde. En effet, dans le cas des CI comprenant une légumineuse une partie de l'azote acquis provient de la fixation symbiotique, ce qui fait que tout l'azote minéral du sol n'est pas prélevé. Entre novembre et « sortie hiver », la quantité d'azote minéral évolue peu, ce qui semble indiquer qu'une partie du profil de sol a pu être lixiviée. Cette petite perte a, semble-t-il, été compensée par la minéralisation nette de la CI. Il est important de noter que la quantité d'azote absorbée par le blé pendant l'hiver ne diffère pas de façon significative entre les trois traitements, ce qui montre que sa nutrition azotée n'a pas été pénalisée par la mise en place d'une culture intermédiaire. En tout état de cause, ces résultats suggèrent qu'il est possible de perdre des quantités importantes d'azote nitrique par lixiviation lors d'un hiver pluvieux comme déjà montré par divers auteurs. Il est également intéressant de noter que la décomposition rapide des résidus CI après leur incorporation induit une libération rapide d'azote minéral bien que le processus se soit produit en hiver ; l'azote minéral étant libéré rapidement, la CI jouera aussi un rôle 'd'engrais vert' pour le blé suivant.

Impacts des cultures intermédiaires sur le rendement du blé panifiable

Nous avons observé, sur la base de l'évolution de l'azote minéral du sol, que les CI permettaient *a priori* de jouer le double rôle de « piège à nitrate » et d'« engrais vert » pour le blé suivant. Il est donc essentiel de vérifier si cela a un effet réel sur le blé et notamment sur son rendement. La Figure 3 montre que le rendement du blé a été, en 2005, amélioré après l'implantation et la destruction d'un mélange vesce-avoine ; cet effet est toutefois en grande partie dû à un reliquat d'azote minéral initial supérieur pour ce traitement (effet de la variabilité spatiale non contrôlé). Par contre, l'utilisation de CI de moutarde n'a pas eu d'effet sur le rendement du blé. En 2006, on observe que l'effet des CI n'a pas été significativement différent de celui des repousses de féveroles, ce qui montre l'intérêt de ces dernières pour jouer un effet « engrais vert » non négligeable.

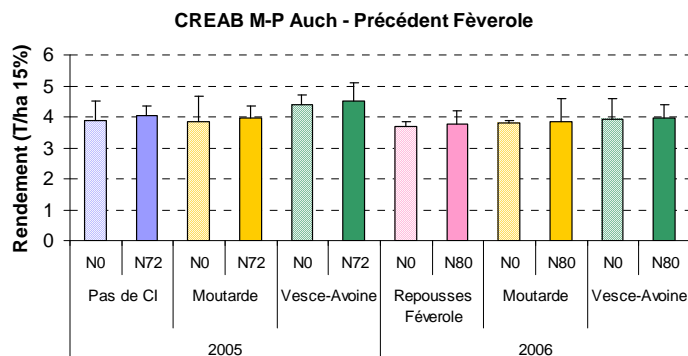


Figure 3 : Rendements du blé tendre panifiable en 2005 et 2006 après un précédent féverole en fonction du type de culture intermédiaire et du niveau de fertilisation organique.

Les résultats indiquent également que la fertilisation organique n'a pas eu d'effet significatif sur le rendement lors des deux années, et ce aussi bien avec que sans culture intermédiaire. Cela confirme la faible efficacité des engrais organiques sur l'amélioration du rendement que nous avons souvent observée dans nos conditions du Sud-ouest de la France. L'effet modéré des CI dans ces essais s'explique en partie par le fait que les hivers ont été peu humides, et que, par conséquent, la lixiviation d'azote nitrique a été faible. Toutefois, ce résultat est cohérent avec l'hypothèse selon laquelle l'intérêt potentiel des CI sera d'autant plus fort que l'hiver sera pluvieux ; en effet, plus la pluviométrie sera forte et plus elle occasionnera une lixiviation importante de nitrate (Mueller et Thorup-Kristensen, 2001).

Impacts des CI sur la teneur en protéines du blé panifiable

Nous avons vu que les effets des CI avaient été faibles sur le rendement du blé et ceci malgré le fait que la dynamique de l'azote minéral dans le sol ait été modifiée. Concernant la teneur en protéines des grains, nos résultats indiquent que la CI vesce-avoine a permis d'augmenter significativement la teneur en protéines du blé alors que la CI de moutarde n'a pas eu d'effet significatif (Figure 4). Les repousses de féverole ont aussi eu un intérêt positif pour augmenter la teneur en protéines du blé comparativement aux autres CI. Cette différence de comportement pourrait s'expliquer par une différence de vitesse de minéralisation des résidus de CI (ou mise à disposition de l'azote pour le blé) et éventuellement d'un effet rhizosphérique positif qui ont eu une incidence sur l'élaboration des composantes du rendement du blé. En effet, après moutarde, le nombre d'épis de blé par unité de surface a été significativement plus élevé qu'après vesce-avoine ou repousses de féveroles, indiquant une disponibilité en azote plus précoce. Par contre, le nombre de grains par épi s'est avéré plus faible (fertilité des épillets plus faible) après moutarde, ce qui signifierait une moindre disponibilité en azote en fin de cycle. En conséquence, il est probable que la remobilisation de l'azote vers les grains a été

améliorée dans la situation après les repousses de fèveroles, sans doute par une meilleure nutrition azotée tardive, expliquant une teneur en protéines des grains plus élevée.

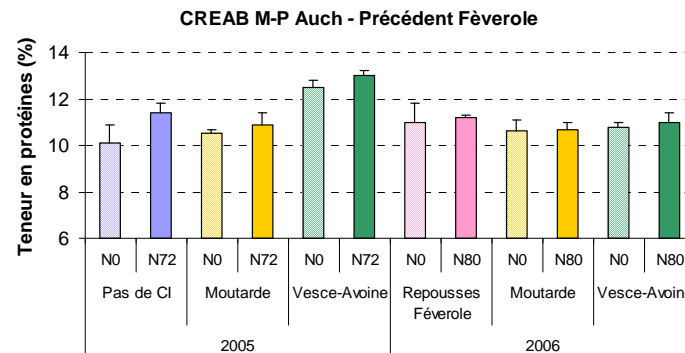


Figure 4 : Teneurs en protéines des graines de blé tendre panifiable en 2005 et 2006 après un précédent fèverole en fonction du type de culture intermédiaire et du niveau de fertilisation.

Ce graphique met également en évidence le fait que la fertilisation organique de printemps (72 à 80 kg N/ha) a un eu effet significatif sur les teneurs en protéines en 2005, mais qui n'a pas été significatif en 2006, illustrant la variabilité interannuelle observée depuis quelques années sur le site.

Les cultures intermédiaires améliorent la valorisation de l'azote minéral du sol en moyenne interannuelle

Comme nous l'avons indiqué précédemment, l'intérêt des cultures intermédiaires dépend fortement du scénario climatique (notamment pluviométrie automnale et hivernale). Pour évaluer l'intérêt des CI en moyenne interannuelle, nous avons réalisé une simulation sur les 15 dernières années à l'aide du modèle STICS (Brisson *et al.*, 1998 ; 2002) en utilisant le climat d'Auch (32). Cette simulation indique, qu'en moyenne sur la série allant de 1990 à 2004, l'utilisation de moutarde en tant que CI permettrait :

- 1) de réduire significativement les pertes de nitrate par rapport à l'absence de CI de l'ordre de 10 kg N/ha en moyenne (Figure 5), illustrant l'effet « piège à nitrate ».
- 2) d'augmenter le rendement du blé d'environ 0.4 t/ha en moyenne (Figure 6) sans autre facteur limitant intervenant en interaction, illustrant l'effet « engrais vert ».

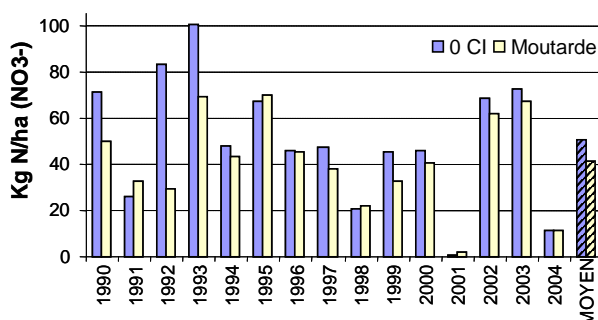


Figure 5 : Simulations indépendante entre années à l'aide du modèle STICS de la lixiviation d'azote nitrique de 1990 à 2004 en fonction de la présence ou non d'une CI de moutarde.

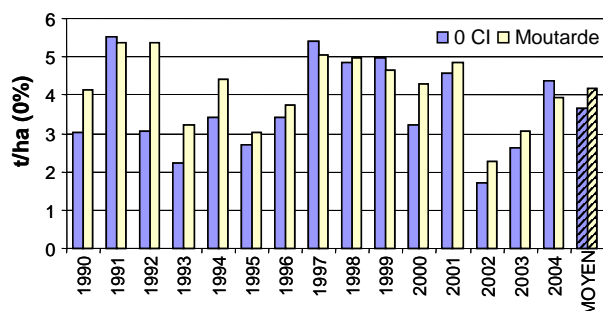


Figure 6 : Simulations indépendante entre années à l'aide du modèle STICS du rendement du blé de 1990 à 2004 en fonction de la présence ou non d'une CI de moutarde.

Si en moyenne l'utilisation de CI de moutarde s'avère utile pour réduire les pertes d'azote nitrique, on observe que l'effet des CI est neutre en cas d'hiver peu pluvieux, comme en 2004 (première expérimentation). *A contrario*, dans le cas d'un hiver pluvieux comme par exemple en 1992 ou 1993, leur utilisation aurait permis une réduction des pertes de nitrate par lixiviation de plus de 60% et une amélioration du rendement du blé de plus de 70%.

Ces résultats d'expérimentation numérique sont à considérer avec précaution en raison des imprécisions du modèle et la non prise en compte de l'effet des bioagresseurs. Toutefois, ces résultats sont cohérents avec les références bibliographiques et la compréhension actuelle des processus.

En conclusion, même sans valorisation immédiate des CI sur le rendement du blé, il est évident que la présence de CI permet systématiquement une amélioration d'ordre environnemental en diminuant la quantité d'azote potentiellement lixiviable. De plus, une utilisation systématique en période d'interculture pourrait permettre à moyen terme d'augmenter significativement le stock de matière organique du sol et donc le potentiel de minéralisation en azote qui détermine la fertilité du sol vis-à-vis de la nutrition azotée des cultures. Une des limites des CI réside toutefois dans le coût supplémentaire qu'induit son implantation et sa destruction. Néanmoins, l'implantation de CI doit être conciliée avec la technique de faux-semis pour réduire les coûts et renforcer l'efficacité de la lutte contre les adventices ; les crucifères comme la moutarde se prêtent assez bien au semis début septembre et aux techniques simplifiées (semis à la volée avant passage de cover crop, par exemple).

2. Intérêts et limites des cultures associées

Les cultures associées (CA) correspondent à des pratiques anciennes de mélange d'espèces notamment pour produire des graines à destination fourragère. Depuis 3 ans, nous évaluons en expérimentation à l'INRA de Toulouse et à la ferme de Beaulieu en AB (Auch, 32), l'intérêt de cultiver du blé dur ou du blé tendre panifiable en mélange avec une espèce protéagineuse (pois d'hiver, féverole ou pois chiche) comme moyen d'améliorer sa teneur en protéines. La récolte se fait en une seule fois mais il est ensuite nécessaire de trier les graines, ce qui peut poser un problème logistique non encore évalué. Nous avons comparé les rendements et la teneur en protéines du blé cultivé en couvert mono-spécifique normal (ou 'blé pur') avec le blé en mélange avec du pois d'hiver (CA).

L'objectif de nos travaux était d'évaluer l'intérêt des CA pour augmenter significativement la teneur en protéines des graines de blé tendre ou de blé dur, grâce à i) la complémentarité des espèces vis-à-vis de l'utilisation des sources d'azote (azote minéral du sol et fixation symbiotique), ii) une meilleure utilisation de l'énergie solaire, et iii) un effet de compétition de la légumineuse sur le blé qui permet une réduction du nombre d'épis qui sont alors mieux alimentés en azote. Ainsi, contrairement à ce que l'on pourrait penser, ce ne sont pas les transferts d'azote de la légumineuse vers la céréale qui permettent d'obtenir une meilleure nutrition azotée du blé mais c'est l'effet d'une complémentarité dans l'utilisation des ressources disponibles et une bonne gestion des compétitions entre la céréale et la légumineuse.

Les cultures associées améliorent la teneur en protéines du blé

On attribue aux associations céréale - légumineuse à graines de nombreux avantages et notamment celui de permettre d'améliorer la teneur en protéines des grains de blé sans apport de fertilisation. Cette hypothèse mérite d'être évaluée pour des cultures d'hiver car peu de références sont disponibles.

Les figures 7 et 8 montrent que, dans le cas du blé dur comme du blé tendre panifiable, la culture associée a toujours permis d'améliorer la teneur en protéines des grains de blé par rapport à la 'culture pure'. Seul le blé tendre fertilisé en 2006 n'a pas eu de gain de protéines en association, à ceci près que l'association avait été fertilisée avec 60 kg N/ha contre 80 kg N/ha pour la culture pure. L'augmentation de la teneur en protéines est de l'ordre de 1.2 point de protéines dans le cas du blé tendre panifiable (au CREAB) et de 1.2 à 2.2 points pour le blé dur (à INRA Toulouse) respectivement en 2007 et 2008 (parcelles avec itinéraires techniques sans intrant de synthèse mais parcelles non certifiées en AB). Il est cependant intéressant de noter que les teneurs en protéines ont été significativement plus élevées en 2007 par rapport à celles de 2006 dans le cas du blé tendre, et ceci, que l'on ait ou non apporté une fertilisation organique. De même, dans le cas du blé dur, les teneurs en protéines ont été significativement plus élevées en 2008 par rapport à 2007.

Enfin, il est intéressant de noter que le gain de protéines obtenu avec un apport d'azote organique est inférieur à celui obtenu grâce à la culture en association. Ce résultat indique que dans le cas où les ressources en azote sont limitantes, la culture du blé en association pourrait permettre de répondre aux exigences de qualité de la filière aval plus efficacement qu'une fertilisation organique.

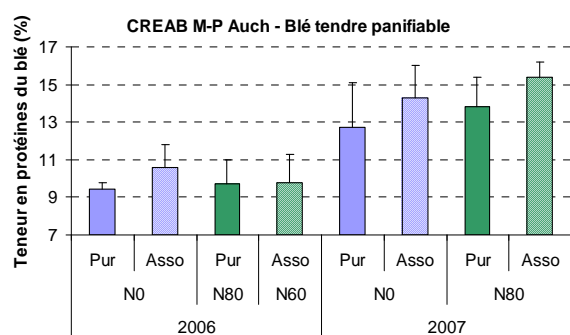


Figure 7 : Teneur en protéines en 2006 et 2007 des grains de blé tendre en 'culture pure' ou en association avec du pois protéagineux en fonction du niveau de fertilisation.

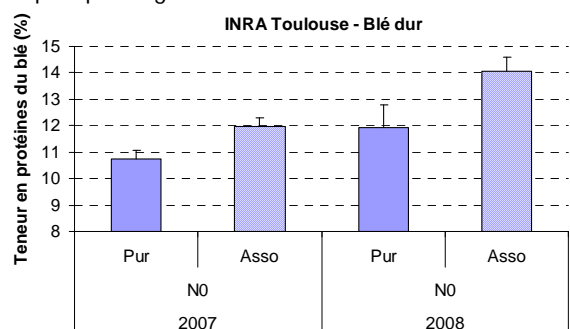


Figure 8 : Teneur en protéines en 2007 et 2008 des grains de blé dur en 'culture pure' ou en association avec du pois protéagineux en fonction du niveau de fertilisation.

Les cultures associées améliorent le rendement relatif

Nous avons vu précédemment que la qualité des grains de blé était sensiblement améliorée dans les associations. Par contre, comme on pouvait s'y attendre, le rendement du blé en association est inférieur à celui du 'blé pur'. Il en est de même pour le pois associé par rapport au 'pois pur'. Par contre,

si l'on avait semé le blé seul ou le pois seul en demie-densité, nous aurions eu un rattrapage de la densité du couvert et donc des rendements proches de ceux des 'cultures pures' en densité normale (résultats non montrés). Cela indique que lorsque ces deux espèces sont associées, elles exercent l'une sur l'autre des compétitions pour les ressources du milieu (eau, azote, lumière...) qui ne leur permet pas de rattraper le rendement des cultures pures. Cependant, il est intéressant de constater que le rendement total de l'association (blé + pois) est supérieur ou égal à celui du blé pur (ou du pois pur) sauf en 2007 au CREAB en raison du fait que le pois n'a pu être récolté à cause d'un fort niveau de maladies (anthracnose principalement) et de ravageurs ayant attaqué spécifiquement l'essai (probablement des rongeurs). Ainsi, il est très probable que l'association soit le plus souvent plus productive que les cultures pures en AB. Cette performance des associations peut être estimée grâce au calcul du LER (Land Equivalent Ratio en anglais) qui est défini comme la surface relative nécessaire en cultures pures pour avoir la même production que l'association (Willey, 1979). Le LER se calcule grâce à l'équation suivante où Y représente le rendement :

$$\text{LER} = (\text{Y Blé Associé} / \text{Y Blé Pur}) + (\text{Y Pois Associé} / \text{Y Pois Pur})$$

Lorsque le LER est supérieur à 1 cela signifie que l'association utilise les ressources du milieu (lumière, eau, azote...) avec une meilleure efficacité que les cultures mono-spécifiques (complémentarité). Inversement, lorsque le LER est inférieur à 1, ce sont les cultures pures qui sont plus efficaces que les cultures associées (compétition antagoniste). Les figures 9 et 10 montrent qu'à l'exception de l'expérimentation au CREAB en 2007, les LER sont significativement supérieurs à 1 avec des valeurs de l'ordre de 1.3 dans le cas des associations avec le blé tendre et de 1.1 à 1.3 dans le cas des associations avec le blé dur. En d'autres termes, il faudrait 1.1 à 1.3 ha de 'cultures pures' pour avoir la même production qu'avec 1 ha d'association, et ceci en respectant la proportion de blé et de pois dans le mélange récolté.

Ces résultats peuvent s'expliquer par plusieurs facteurs. Tout d'abord, les deux espèces sont complémentaires d'un point de vue de l'utilisation des différentes sources d'azote. En effet, si la céréale ne peut utiliser que l'azote minéral du sol, la légumineuse elle, a la capacité de fixer l'azote de l'air via la symbiose et donc cela lui permet de ne pas être en compétition avec le blé pour cette ressource azotée (complémentarité de niche). Ensuite, ces deux espèces sont complémentaires d'un point de vue de l'utilisation de l'espace en raison d'architectures aériennes très différentes. Enfin, ces deux espèces sont complémentaires d'un point de vue temporel en raison de pics de croissance décalés. Si l'on schématise, dans un premier temps, le blé va se développer plus rapidement, le pois d'hiver restant au ras du sol à l'état de rosette. Dans un second temps, le pois aura une croissance plus rapide en profitant notamment du blé comme d'un tuteur. Enfin, en fin de cycle, lorsque le pois aura atteint sa maturité, le blé terminera sa croissance et le remplissage de ses grains.

Il est intéressant de noter que le blé tendre est toujours très majoritaire dans le mélange final et ceci en raison notamment des maladies du pois (en particulier anthracnose) qui sont survenues avec virulence sur l'essai du CREAB à Auch en 2006 (Figure 9) mais également en raison des attaques localisées de ravageurs, certainement des rongeurs, qui se sont attaqués spécifiquement au pois de cet essai (effet « parcelle de petite dimension » non représentatif de la réalité agricole). Par contre, dans le cas du blé dur (Figure 10), on remarque que le mélange est plus équilibré car le pois n'a pas subi d'attaque d'anthracnose très forte sur les essais de Toulouse et qu'il n'y a pas eu de fortes pertes liées aux ravageurs. Ces résultats montrent donc que, bien que le blé soit plus haut que le pois, la légumineuse exerce une compétition non négligeable sur la céréale qui permet de limiter le tallage du blé. Par conséquent, si l'on fait l'hypothèse que la légumineuse utilise essentiellement l'azote de l'air (> 90% dans nos expérimentations), cela signifie que l'essentiel de l'azote minéral du sol sera disponible pour le blé. Or, si celui-ci produit moins de talles et donc moins d'épis. Ainsi, la quantité d'azote disponible par épi et donc par grain sera supérieur par rapport à une 'culture pure'. Cela explique donc en grande partie les gains observés dans les teneurs en protéines des grains de blé dans les cultures associées. Pour autant, le fonctionnement des CA est un peu plus complexe. En effet, on observe dans le cas du

blé tendre une faible perte de rendement entre 'blé pur' et blé associé mais des augmentations non négligeables dans les teneurs en protéines. Il se pourrait donc que l'association limite la formation de tardillons (épis n'arrivant pas à maturité) et permette ainsi une meilleure concentration en protéines dans les grains. Il est cependant nécessaire d'étudier plus précisément les dynamiques de croissance des deux espèces, les composantes du rendement ainsi que les maladies et les ravageurs pour pouvoir conclure avec certitude sur ces hypothèses, et plus largement, pour comprendre et modéliser les dynamiques de compétition dans les cultures associées en vue d'optimiser leur itinéraire technique.

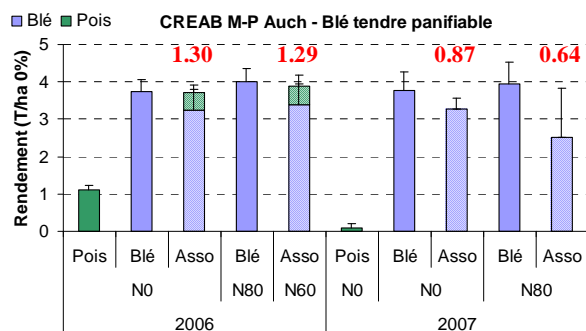


Figure 9 : Rendements en 2006 et 2007 du pois et du blé tendre en culture pure et en association en fonction du niveau de fertilisation. Les chiffres en rouge au dessus des barres indiquent les valeurs de LER.

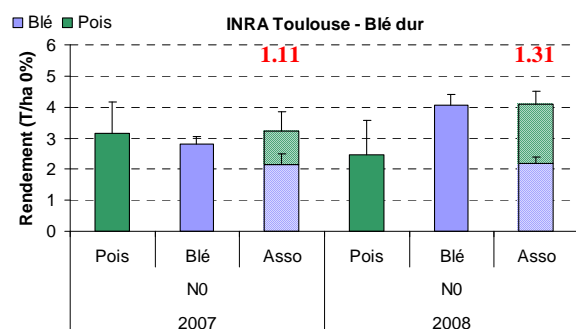


Figure 10 : Rendements en 2007 et 2008 du pois et du blé dur en culture pure et en association en fonction du niveau de fertilisation. Les chiffres en rouge au dessus des barres indiquent les valeurs de LER.

Conclusions et perspectives

Si le choix du précédent cultural reste un levier important à prendre en considération, il existe d'autres solutions agronomiques complémentaires pour améliorer le rendement et la teneur en protéines des grains de blé (culture exigeante en azote). L'utilisation d'engrais organique a parfois été privilégiée, mais du fait de son efficacité variable (CAU souvent faible), il est apparu nécessaire de rechercher des innovations permettant de mieux valoriser toutes les ressources en azote. L'utilisation des cultures intermédiaires (CI) et des cultures associées (CA) pourrait être l'une des réponses à cet enjeu, mais plus largement, il pourrait s'avérer utile de **combinaison des différents leviers disponibles (précédent, CI, CA et engrais organique) dans un objectif de gestion de l'azote au niveau du système de culture dans le temps et l'espace.**

Les CI, semées en été et enfouies avant le semis du blé en novembre, permettent de limiter les pertes hivernales de nitrate dans le cas d'années pluvieuses, ce qui prouve leur efficacité en tant que 'piège à nitrate'. Par ailleurs, les CI permettent d'augmenter le rendement et la teneur en protéines des grains de blé en raison de l'absorption d'azote minéral du sol et d'une dégradation rapide des résidus enfouis leur conférant le rôle 'd'engrais vert'. Les CA permettent, quant à elles, d'augmenter la teneur en protéines des grains de blé grâce à une complémentarité entre les espèces dans l'utilisation des

sources d'azote (N minéral du sol et fixation symbiotique de N₂). Les CA permettent également une meilleure utilisation de l'énergie solaire et ont un effet positif de compétition de la légumineuse sur le blé car cela permet de réduire le nombre d'épis, qui seront alors mieux remplis en protéines. Cependant, il reste à optimiser les itinéraires techniques des CA, et ceci, en fonction des objectifs privilégiés. Pour ce faire, nous disposons de plusieurs leviers, tels que le choix des **variétés de blé, des espèces et variétés de protéagineux** mais également des **dates de semis du pois, de la proportion des deux espèces, du précédent cultural et de la disponibilité en azote (fertilisation organique)**.

D'un point de vue général, il est nécessaire de proposer des règles de décision au niveau du système de culture pour optimiser la gestion de l'azote. Actuellement, nos projets en cours sur les CA visent à confirmer ces premiers résultats et à amplifier leur évaluation *via i)* la modélisation dynamique des CA et l'optimisation de leurs itinéraires techniques (thèse en cours de Laurent Bedoussac, 2006-2009), *ii)* l'évaluation des performances des CA dans un réseau d'agriculteurs en AB en conditions réelles (projet PSDR Midi-Pyrénées CITODAB, 2009-2010). Il serait également important de réfléchir *i)* à la place des cultures associées dans les rotations pour optimiser les systèmes de culture et *ii)* à leur effet à court et moyen terme vis-à-vis des risques de maladies et de ravageurs ou de leur effet bénéfique pour réduire leur impact sur le rendement des cultures.

Références bibliographiques

- Brisson N., Mary B., Ripoche D., Jeuffroy M.H., Ruget F., Gate P., Devienne-Barret F., Antonioletti R., Durr C., Nicoulaud B., Richard G., Beaudoin N., Recous S., Tayot X., Plenet D., Cellier P., Mchet J.M., Meynard J.M., Delécolle R., 1998. STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balance. I Theory and parameterization applied to wheat and corn. *Agronomie* 18, 311-346.
- Brisson N., Ruget F., Gate P., Lorgeou J., Nicoulaud B., Tayot X., Plenet D., Jeuffroy M.H., Bouthier A., Ripoche D., Mary B., Justes E., 2002. STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balance. II Assessment by comparing with experimental reality for wheat and corn. *Agronomie* 22, 69-93.
- David C., Jeuffroy M.H., Recous S., Dorsainvil F., 2004. Adaptation and assessment of the Azodyn model managing the nitrogen fertilization of organic winter wheat. *European Journal of Agronomy* 21, 249-266.
- David C., Jeuffroy M.H., Laurent F., Mangin M., Meynard J.M., 2005. The assessment of a decision making tool for managing the nitrogen fertilization of organic winter wheat. *European Journal of Agronomy* 23, 225-242.
- David C., Jeuffroy M.H., Henning J., Meynard J.M., 2005. Yield variation in organic winter wheat: a diagnostic study in the Southeast of France. *Agronomy for Sustainable Development* 25, 213-223.
- David C., Viaux P., Meynard J.M., 2004. Les enjeux de la production de blé tendre en agriculture biologique. *Courrier de la cellule environnement de l'INRA*, 43-53.
- Desclaux D., Nolot J.M., Chiffolleau Y., Gozé G., Leclerc C., 2008. Changes in the concept of genotype x environment interactions to fit agriculture diversification and participatory plant breeding. *Pluridisciplinary point of view. Euphytica* (in press).
- Hansen B., Kristensen E.S., Grant R., Høgh-Jensen H., Simmelsgaard S. E., Olesen J. E., 2000. Nitrogen leaching from conventional versus organic farming systems - a systems modelling approach. *European Journal of Agronomy* 13, 65-82.
- Hauggaard-Nielsen H., Ambus P., Jensen E.S., 2001. Interspecific competition, N use and interference with weeds in pea - barley intercropping. *Field Crops Research* 70, 101-109.
- Hauggaard-Nielsen H., Ambus P., Jensen E.S., 2003. The comparison of nitrogen use and leaching in sole cropped versus intercropped pea and barley. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 65, 289-300.
- Jensen E.S., Ambus P., Bellostas N., Boisen S., Brisson N., Corre-Hellou G., Crozat Y., Dahmann C.,

- Dibet A., von Fragstein P., Gooding M., Hauggaard-Nielsen H., Kasyanova E., Launay M., Monti M., Pristeri A., 2006. Intercropping of cereals and grain legumes for increased production, weed control, improved product quality and prevention of N-losses in European organic farming systems. European Joint Organic Congress, 30-31 May, Odense, Denmark, 180-181.
- Kinane J. S., Lyngkjær M., 2002. Effect of barley-legume intercrop on disease in an organic farming system. Annual report of the Danish research centre for organic farming.
- Mueller T., Thorup-Kristensen K., 2001. N₂-fixation of selected green manure plants in an organic crop rotation. *Biological Agriculture and Horticulture* 18, 345-363.
- Prieur L., Justes E., 2006. Disponibilité en azote provenant de l'effet du précédent légumineuse, de culture intermédiaire et d'engrais organique. Conséquences sur le rendement et la teneur en protéines du blé tendre d'hiver. *Alter Agri* 80, 13-17.
- Stockdale E.A., Shepherd M.A., Fortune S., Cuttle S.P., 2002. Soil fertility in organic farming systems fundamentally different? *Soil Use and Management* 18, 301-308.
- Stopes C., Lord E.I., Philipps L., Woodward L., 2002. Nitrate leaching from organic farms and conventional farms following best practice. *Soil Use and Management* 18, 256-263.
- Vandermeer J.H., 1989. *The Ecology of Intercropping*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Watson C.A., Atkinson D., Gosling P., Jackson L.R., Rayns F.W., 2002. Managing soil fertility in organic farming systems. *Soil Use and Management* 18, 239-247.
- Willey R.W. 1979. Intercropping. Its importance and research needs. Part 1. Competition and yield advantages. *Field Crops Abstract* 32, 2-10.