

Améliorer la qualité technologique, nutritionnelle et sanitaire du blé biologique Principaux leviers agronomiques et technologiques

David C.¹, Abecassis J.², Carcea M.³, Celette F.¹, Corre-Hellou G.⁵, Friedel J.⁴, Hiltbrunner J.⁷,
Mader P.⁶, Messmer M.⁶, Narducci V.³, Peigné J.¹, Thomsen I.K.⁸

¹ ISARA Lyon, UR SCAB, Systèmes céréaliers AB, F-69364 Lyon

² INRA, UMR 1208, Ingénierie des agropolymères et techniques émergentes, F-34060 Montpellier

³ CRA-Centro di Ricerca per gli Alimenti e la Nutrizione, IT-00178 Roma

⁴ Groupe ESA, UR LEVA, Légumineuses, écophysologie végétale, agroécologie, F-49007 Angers

⁵ BOKU, Department of sustainable agricultural systems, University of natural resources and applied life sciences, AU-1180 Wien

⁶ FiBL, Research institute of organic agriculture, CH-5070 Frick

⁷ ART, Agroscope Reckenholz-Tänikon, CH-8046 Zurich

⁸ Aarhus University, Department of Agroecology, DK-8830 Tjele

Correspondance : davidc@isara.fr

Résumé

Les acteurs de la filière blé biologique panifiable font face à divers enjeux complémentaires voire parfois contradictoires. Les agriculteurs et transformateurs souhaitent augmenter les niveaux de production tout en satisfaisant prioritairement les attentes des consommateurs pour une alimentation de meilleure qualité nutritionnelle et sanitaire, plus durable et plus respectueuse de l'environnement. Le projet européen AGTEC-Org a eu pour objectif d'identifier les leviers agronomiques et technologiques permettant d'améliorer conjointement la productivité et la qualité des blés et des farines biologiques. Il a réuni agronomes, technologues et économistes issus de 9 centres de recherche et universités européennes pour un budget total de 1,5 M€. Plus de 400 traitements expérimentaux ont été analysés à partir de 23 expérimentations agronomiques et 4 expérimentations technologiques. Le choix de la variété est un moyen efficace pour obtenir une qualité de grain supérieure. L'insertion de légumineuses (grain ou fourrage) dans le blé améliore la compétition avec les adventices et la nutrition azotée du blé et/ou de la culture de printemps suivante. L'utilisation régulière d'engrais vert peut être une alternative pour compenser l'absence de fumiers sur l'exploitation. La fertilisation organique améliore le rendement et la qualité des blés lorsque la nutrition hydrique est assurée. La suppression du labour peut affecter la fertilité du sol et le rendement du blé alors qu'elle n'intervient pas sur la qualité du grain.

Le mode de broyage (meule de pierre vs cylindres) influence fortement les caractéristiques technologiques, la sécurité sanitaire et la valeur nutritionnelle de la farine. Le broyage sur meule améliore la composition nutritionnelle mais augmente aussi la présence de certains contaminants. Les caractéristiques de la farine broyée sur meule de pierre sont moins influencées par le rendement en mouture. Au contraire, les caractéristiques de la farine obtenue par cylindre apparaissent très dépendantes du rendement en mouture. Augmenter le rendement en farine dans l'objectif d'enrichir la qualité nutritionnelle réduit aussi bien la sécurité sanitaire (DON) que la qualité boulangère (volume du pain). Le décorticage des grains avant broyage diminue les risques sanitaires en réduisant le taux de mycotoxines (DON) de 50%.

Mots-clés : blé tendre panifiable, rendement, valeur boulangère, techniques culturales, techniques de mouture

Abstract: Improving baking quality, nutritional value and safety of organic winter wheat

The organic bread wheat market has been diversified over time through the emergence of different sale channels. Processors require organic bread wheat of higher quality and safety in order to meet the consumers' demand. The overall objective of the AGTEC-Org project was to identify agronomical and technological ways to improve the performance of organic wheat and flour. The findings would contribute to enhanced baking quality and nutritional value of organic flour, as well as prevention of mycotoxin contamination. The project involved 9 research centers or universities from 5 European countries for a total budget of about 1.5 million €. More than 400 experimental treatments were analyzed from 23 agronomic trials and 4 lab-experiments on food technology. Choice of cultivar is an efficient way to obtain higher grain quality. Intercropping legumes (grain or forage) improves weed control and N availability for wheat crop or succeeding crop. Green manure can be an effective alternative to farmyard manure. Fertilization with organic fertilizers improves yield and quality when water is available. Reduced tillage affects soil fertility and wheat yield but has little effects on grain quality.

Milling process strongly influences flour characteristics. Stone milling improves the nutritive value and flour characteristics remain very stable independently of the milling yield. However, stone milling slightly raises DON levels. Characteristics of flour produced by means of roller milling appear very dependent on milling yield, instead. Increasing milling yield with the aim of enriching nutritional quality has a detrimental effect on either safety (DON) or bread-making quality (bread volume). Debranning before milling has a very positive impact on flour safety by reducing its DON content by 50 %.

Keywords: baking wheat, yield, baking value, cultural practices, milling techniques

1. Les enjeux de la filière blé panifiable biologique

Depuis la fin des années 90, la demande européenne en produits biologiques croît de façon soutenue induisant plus de 20% d'importations (EC, 2010). Les politiques européennes et nationales de soutien à l'agriculture biologique ont ainsi favorisé l'accroissement de la production représentant 5% des surfaces en 2010. En France, les surfaces en AB ont doublé au cours des 5 dernières années, cet accroissement devrait se poursuivre grâce au nouveau programme Ambition BIO 2017. La dynamique de développement de l'agriculture biologique diffère selon les productions (CGAAER, 2012). Certaines productions extensives, telles que les surfaces fourragères, et d'autres faisant face à des situations de crise, telles que l'arboriculture ou la viticulture, ont été facilement portées à développer l'AB (soit 7 à 12% de ces filières en 2011). En revanche, les grandes cultures dont la santé économique est meilleure se sont faiblement converties, représentant moins de 2% en France. Dans les exploitations de grandes cultures biologiques, le blé tendre panifiable représente un tiers des surfaces en céréales (EC, 2010) suite à une demande soutenue en alimentation humaine. Malgré les mesures de soutien public et le maintien de prix élevés, les producteurs biologiques se trouvent confrontés à des niveaux de productivité jugés trop faibles et trop irréguliers pour encourager de nouvelles conversions. Par exemple, malgré la production de nouvelles références techniques, le blé panifiable biologique se caractérise depuis plus de 10 ans par des rendements variables et faibles : la moyenne française équivalente à 32 quintaux en 2011 - FranceAgriMer 2011 - n'a pas ou peu progressé – David *et al.* (2004). Les déficits en azote et la compétition par les adventices demeurent les deux principaux facteurs limitant la productivité (Casagrande *et al.* 2009). Le choix variétal constitue un élément majeur de la productivité et de la qualité boulangère du blé bio. Pour autant, la qualité technologique et nutritionnelle de la farine est fortement influencée par les techniques agronomiques mises en place et par les techniques de transformation du grain. De même, la contamination des grains par les mycotoxines et l'enherbement des cultures interviennent directement sur la qualité sanitaire du grain.

Le marché du pain bio s'est diversifié suite à l'implication de la grande distribution et au développement des magasins spécialisés. Les exigences en qualité et en sécurité alimentaire se renforcent. Par exemple, la filière biologique fait face au risque de contamination des farines par les mycotoxines qu'il convient de contrôler non seulement au champ mais aussi lors du stockage des grains.

Actuellement, la plupart des transactions entre producteurs de blé, collecteurs et meuniers reposent sur la mesure de la teneur en protéines d'un échantillon pour juger de l'aptitude à la panification. Bien que la teneur en protéines des blés AB ait progressé au cours du temps, les teneurs seuils définies par les collecteurs (l'Association Nationale de la Meunerie Française propose un seuil minimal de 10,5%) conduisent encore à d'importants déclassements en alimentation animale. Selon Taupier-Letage *et al.* (2008) la teneur en protéines, largement utilisée pour le classement des blés, ne peut être utilisée seule en AB pour plusieurs raisons :

- les teneurs en protéines des blés en AB sont globalement plus faibles qu'en agriculture conventionnelle, on manque de références en conditions biologiques reliant la teneur en protéines des grains à la qualité technologique des pains.

- la teneur en protéines des blés semble mal corrélée avec les notes de panification obtenues sur les mêmes lots.

La consommation de pain plus complet a fait l'objet d'une recommandation dans le Programme National Nutrition Santé 2011-2015. C'est pourquoi il est souhaitable de réorienter la production de la filière vers des produits autres que le pain blanc en utilisant par exemple des farines plus complètes. La panification en bio est majoritairement faite sur une base de levain et non de levure, utilisant souvent une farine semi-complète de type 80 (environ 40% des volumes d'après les données statistiques disponibles). Le taux de cendres plus élevé de la farine contribue alors à une modification de la qualité organoleptique et nutritionnelle (Arvalis, 2013). De même, les types de mouture (meule ou cylindre) interviennent directement sur la qualité des farines et des pains.

Le programme européen AGTEC-Orgavait pour but d'identifier certains leviers agronomiques et technologiques améliorant la productivité et la qualité du blé et de la farine biologique. Le projet a impliqué une équipe de 22 agronomes, technologues et économistes issus de 9 centres de recherche ou universités répartis sur 5 pays européens (Autriche, Danemark, France, Italie, Suisse) ; Il a été financé à hauteur de 1,5 millions d'€ dans le cadre de l'initiative européenne ERANET CORE Organic. Diverses expérimentations menées sur 11 essais long-terme et 12 parcelles en réseau ont permis de tester diverses pratiques agronomiques intervenant sur la fertilité du sol, la nutrition minérale et le contrôle des adventices. Une étude spécifique des conditions de mouture a été menée pour chercher à découpler l'enrichissement en micronutriments des farines, de leur taux d'amidon endommagé et si possible de leur teneur en fibres. Enfin, deux techniques de traitement des grains ont été testées pour limiter la contamination par les mycotoxines mais aussi modifier la qualité organoleptique et nutritionnelle des farines.

2. Les leviers agronomiques pour améliorer la productivité et la qualité du blé

2.1 Des conditions de marché influençant les exploitations bio

Traditionnellement, la production de céréales biologiques était le fait d'exploitations de polyculture-élevage dont la majeure partie des productions était consommée sur l'exploitation. Dès la fin des années '90', la demande soutenue en céréales biologiques destinées à l'alimentation humaine conduit à la conversion d'exploitations de grandes cultures sans élevage. Alors que les performances des exploitations AB s'appréhendent à l'échelle de la rotation, en combinant les bénéfices directs et indirects des cultures, la part de céréales destinées à l'alimentation humaine se renforce au détriment des cultures fourragères. Le raisonnement agronomique de l'agriculteur est alors modifié par des

opportunités commerciales ¹qui se développent dans un marché encore instable et peu mature (David, 2009). Par exemple, le fort différentiel de prix bio/conventionnel observé sur le blé panifiable (de 150 à 300%) explique la prédominance de cette culture dans les rotations bio au détriment des protéagineux ou des céréales secondaires. De même, les cultures fourragères, faiblement valorisées, régressent dans les exploitations de grande culture malgré leurs intérêts pour le contrôle des adventices, l'enrichissement en azote du sol et la préservation de la biodiversité.

2.2 Principales questions techniques

Les performances du blé panifiable AB se caractérisent par des rendements et des taux de protéines faibles et variables (Casagrande *et al.*, 2009). Les exploitations céréalières sans élevage sont confrontées à de fréquents stress azotés intervenant directement sur la productivité et la qualité du blé. La compétition par les adventices est considérée comme le problème majeur aux yeux des céréaliers AB alors que le contrôle des maladies et des ravageurs est pour partie assuré par le choix variétal. Les programmes de sélection et de criblage variétal, menés en France depuis 2000, ont intégré le pouvoir couvrant, la hauteur de paille et la moindre sensibilité au stress azotés dans les critères de sélection des blés bio. La sélection et l'inscription au catalogue de nouvelles variétés sélectionnées pour l'AB est une avancée complémentaire au programme de criblage de variétés existantes (Rolland *et al.*, 2012).

2.3 Incidence de la simplification du travail du sol sur les performances du blé AB

La simplification du travail du sol en productions céréalières AB fait l'objet d'un intérêt particulier des agriculteurs (Mäder et Berner 2012 ; Peigné *et al.*, 2007). En agriculture conventionnelle, ces techniques culturales simplifiées sont connues pour favoriser la qualité du sol mais aussi pour limiter les temps de travaux et la consommation en énergie (Holland, 2004). Toutefois, l'application de ces techniques en AB modifie plusieurs paramètres tels que la dynamique de minéralisation, la circulation de l'eau mais aussi le contrôle des adventices, ce qui influence directement les performances du blé. Le programme AGTEC-Org a permis de comparer en situation expérimentale sur plusieurs années, le labour à des techniques sans labour. Trois expérimentations long-terme, implantées en 2003 (Suisse, essai Fibl), 2004 (France, essai ISARA) et 2006 (France, essai ESA Angers) comparent quatre techniques culturales, du labour traditionnel (30 cm de profondeur) au travail très simplifié (5 à 10 cm de profondeur). De même, un réseau de 12 parcelles, mise en place en 2004 dans l'Ouest et le Sud-Est de la France, compare sur une rotation un labour à une technique simplifiée (travail superficiel des premiers centimètres). Les principaux résultats des expérimentations long-terme ont été récemment publiés (Peigné *et al.*, 2013b). Les conclusions sont :

- Les pertes de rendement observées dans les situations sans labour sont principalement le fait d'une forte présence d'adventices (Figure 1). Lorsque le contrôle des adventices est assuré (par exemple dans le cas des sites 1 (2006-07) et 3 (2008-09) de la Figure 1), le rendement en situation sans labour est au moins égal aux situations avec labour ;
- La fertilité du sol s'améliore à moyen terme dans les situations sans labour en sol argileux, et ce grâce à l'augmentation de l'activité des vers de terre présents dans les horizons superficiels. En revanche, les techniques culturales simplifiées ont tendance à compacter les horizons non travaillés ce qui limite le développement racinaire (Peigné *et al.*, 2013a). Cette situation observée en sols légers (sables ou limon fins) et/ou sensibles au tassement conduit à une baisse de rendement et de la teneur en protéines ;

¹ Existence d'un différentiel de prix Bio/Conventionnel variable (de 20 à 300% selon les débouchés). Développement de marchés niches non stabilisés dans le temps suite à une demande et des importations fluctuantes.

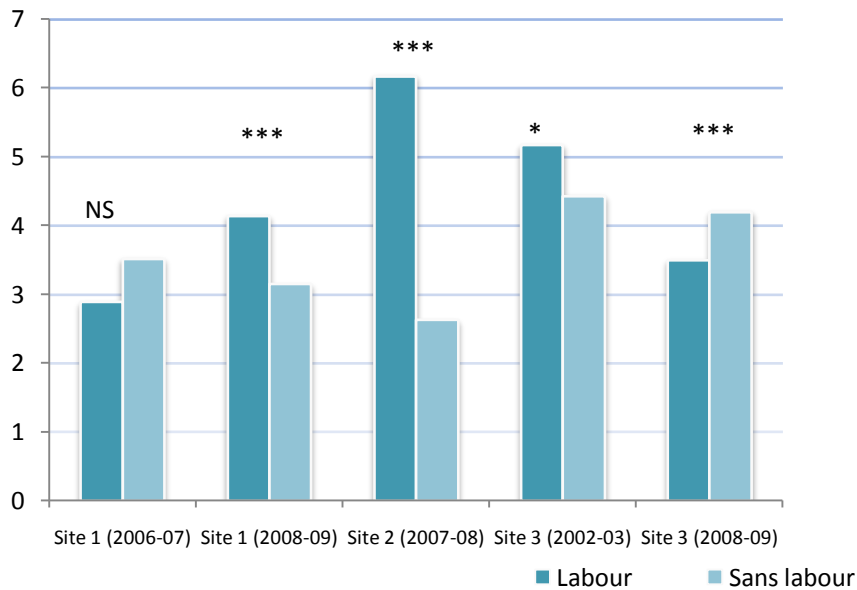


Figure 1 : Effet comparé du labour et du travail simplifié sur le rendement en grains du blé (t MS ha⁻¹). Les étoiles indiquent une différence significative entre traitements (*** $p < 0.05$ * $p < 0.10$).

- Le semis direct et l'insertion d'un couvert végétal augmentent à moyen terme la densité et l'activité des vers de terre, ce qui limite, dès les premières années, les effets de la compaction observés dans les sols fragiles. A l'inverse, la compétition des adventices, lorsqu'elle est mal maîtrisée, est le facteur limitant majeur des techniques de semis direct ;
- Les techniques culturales simplifiées interviennent peu sur la qualité boulangère malgré la baisse de la teneur en protéines et l'augmentation du ratio gliadines/gluténines observée dans certaines situations sans labour (Figure 2);

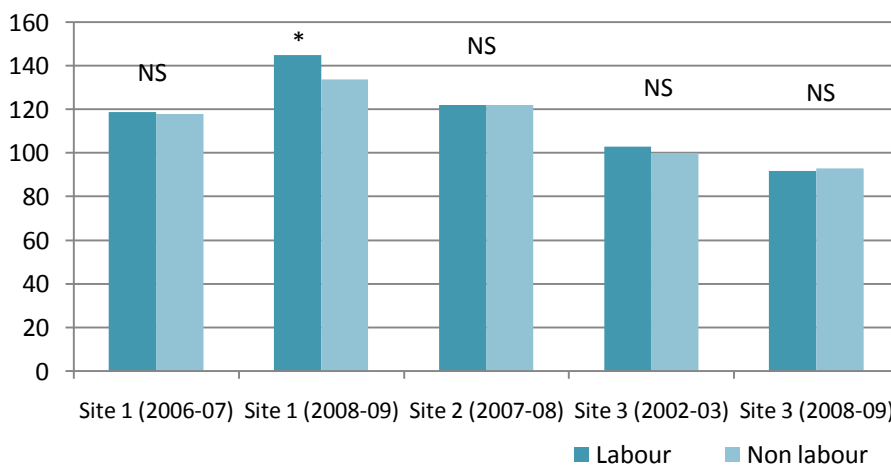


Figure 2 : Effet comparé du labour et du travail simplifié sur la teneur en protéines des grains du blé (g kg⁻¹). Les étoiles indiquent une différence significative entre traitements (*** $p < 0.05$ * $p < 0.10$).

- Les techniques culturales simplifiées produisent un mulch en surface qui limite les phénomènes d'érosion et de lessivage sur les sols légers. En revanche, ce mulch de surface peut augmenter le risque de contamination par les mycotoxines dans le cas de précédents maïs. Toutefois aucun essai n'a montré de différences significatives entre labour et non labour, les teneurs mesurées étant très en dessous des seuils de contamination acceptés pour la consommation humaine.

En conclusion, les techniques culturales simplifiées ont un effet dépressif sur le rendement si le système de culture ne permet pas de contrôler les adventices et de maintenir la fertilité du sol (et plus particulièrement la structure du sol). Les résultats des techniques testées sont variables en fonction du type de sol, de son niveau de fertilité et de la durée de conversion aux techniques simplifiées sans inversion de la couche de surface.

2.4 Incidence des pratiques de gestion de l'azote sur les performances du blé AB

L'apport d'azote en systèmes céréaliers AB est assuré à partir de la fourniture du sol et des apports exogènes. La présence d'un élevage au sein des exploitations AB est le moyen le plus sûr d'équilibrer les besoins en nutriments (azote mais aussi phosphore et potasse) des cultures. Selon Foissy *et al.* (2013), le déficit en azote des exploitations cérésières peut être compensé par l'apport d'amendements organiques exogènes issus d'un élevage à proximité et/ou par l'augmentation de la part de cultures fixatrices d'azote dans la rotation (prairies ou légumineuses annuelles). Le volume d'amendements organiques produits par l'élevage et la part de cultures fourragères au sein de la sole arable sont des éléments majeurs pour juger de la couverture des besoins azotés des cultures arables (Nowak *et al.*, 2013). Ainsi, la mixité des exploitations sur le territoire facilite les échanges de matières au sein des exploitations AB ou entre exploitations AB et conventionnelles.

Les objectifs de production (rendement et teneur en protéines) conditionnent les besoins en azote. Il est important d'adapter le mode de fertilisation (date et quantité d'apports) au niveau de fournitures du sol mais aussi au type de produits organiques utilisés. Le projet AGTEC-ORG a étudié l'effet de diverses sources d'azote, combinées ou non, sur la productivité et la qualité du blé. L'apport de fumiers compostés à l'automne conduit à un effet modéré sur les performances du blé AB. A l'inverse, l'apport de fertilisants organiques à minéralisation rapide améliore le rendement et la qualité du grain si leur utilisation est raisonnée (calage des apports dans des périodes de précipitation régulières afin d'éviter des pertes par volatilisation, bon contrôle des adventices, prise en compte des cinétiques de minéralisation des produits).

Sur les sols à forte teneur en matière organique, l'utilisation régulière d'engrais verts au sein de la rotation peut améliorer la productivité du blé sans incidence significative sur la qualité. Par exemple, Thomsen *et al.* (2011) confirment que l'introduction de trèfle et de ray-grass au sein d'une rotation cérésièrre améliore le rendement du blé AB sans modifier la teneur en protéines et la valeur boulangère.

Sur des sols moins fertiles, les apports d'engrais organiques coûteux ne peuvent être rentables que si la culture de blé n'est pas concurrencée par les adventices et/ou ne souffre pas de stress hydrique prolongé (sols très superficiels, région déficitaire en précipitation au printemps). La contribution seule des engrais verts précédant le blé est insuffisante pour augmenter le rendement et la teneur en protéines. Il convient alors de compléter les besoins des cultures par des apports réguliers d'amendements ou d'engrais organiques et/ou par l'incorporation répétée de légumineuses au sein de la rotation.

2.5 Intérêt des associations végétales et incidence sur les performances du blé AB

Malgré les services multiples assurés par les légumineuses (apport d'azote, contrôle des adventices, augmentation de la biodiversité, amélioration de la fertilité du sol), leur part dans les rotations cérésières AB est en nette diminution au bénéfice des céréales jugées plus rentables. Il est important de stabiliser voire d'augmenter la part de légumineuses dans la rotation sans diminuer la part de cultures de vente. La pratique des engrais verts, courante en AB, est sensible aux conditions

climatiques d'interculture (ex. déficit hydrique en période estivale). Le projet AGTEC-Org s'est intéressé aux modes d'associations légumineuses-blé en étudiant trois modes d'association simultanées:

(i) Le mélange blé-pois implanté de façon simultanée afin d'augmenter et stabiliser les performances cumulées des deux cultures de vente, d'améliorer la teneur en protéines du blé et de réussir à produire des protéagineux en limitant les difficultés rencontrées en culture pure (verse, adventices, maladies) (Corre-Hellou *et al.*, 2011)

(ii) L'insertion du blé dans un couvert de légumineuse fourragère déjà en place – association dite dans un couvert vivant - afin d'améliorer les performances du blé en assurant une alimentation azotée supplémentaire² mais aussi un contrôle de l'érosion et des adventices durant l'interculture. La légumineuse peut être une source supplémentaire de fourrages (Hiltbrunner *et al.*, 2007b),

(iii) la mise en place de légumineuses fourragères sous couvert de blé - association en relais. Le but est d'insérer au printemps une légumineuse dans un blé en début de tallage afin d'améliorer la nutrition des cultures suivantes et de couvrir le sol pour maîtriser le développement de la flore adventice notamment durant l'interculture.

Douze expérimentations ont été mises en place, en France et en Suisse, sur trois années culturales différentes. Les principaux résultats, décrits dans plusieurs articles (Hiltbrunner *et al.*, 2007b, 2008 ; Amosse *et al.*, 2013), sont synthétisés ci-après :

Les trois modes d'association interviennent différemment sur les performances du blé (Figure 3).

Le rendement du blé dans l'association blé-pois d'hiver est en moyenne égal à 80% du rendement du blé pur. L'association blé-pois hiver conduit en moyenne à un rendement additionnel des deux cultures de 30%. Ce gain peut dépasser 50% dans les situations où des problèmes particuliers sur une des deux espèces en cultures pures ne se retrouvent pas en cultures associées (ex de l'enherbement). Le rendement du pois protéagineux dans l'association est souvent proche de celui obtenu en culture pure alors que les densités de semis sont moindres grâce à un meilleur contrôle des adventices mais aussi à une moindre présence des ravageurs et des maladies du pois. L'association des deux cultures conduit à une amélioration nette de la qualité du grain (teneur et composition en protéines, teneur en gluten, index de Zéleny et temps de chute d'Hagberg) suite à une meilleure alimentation azotée du blé (Figure 4). L'association blé-pois permet de se passer des apports de fertilisants sur blé ce qui améliore la rentabilité de la culture.

Le semis de blé dans un couvert vivant de légumineuse conduit à des niveaux de performances très variables. Hiltbrunner *et al.* (2007b, c) a montré qu'un couvert non contrôlé mécaniquement pouvait induire une forte compétition sur les ressources hydriques et minérales ; les fortes biomasses de la légumineuse entraînent une compétition sur le blé entraînant des pertes fréquentes de plus de 50% du rendement du blé (Figure 3). Le semis de blé en couvert vivant conduit à une amélioration nette de la qualité du grain (plus forte teneur en gliadines, meilleur équilibre gliadines/gluténines plus forte teneur en gluten et index de Zéleny).

Le semis de légumineuse fourragère en relai conduit à des niveaux de performances du blé très variables. Le rendement en grain du blé est, en moyenne, pas ou peu affecté par la légumineuse implanté sous couvert. Toutefois, certaines espèces fourragères, peu sensibles à l'ombrage (ex. du trèfle violet et de la minette), peuvent se développer fortement lors de la maturité des grains³ ce qui conduit à une réduction de la teneur en protéines des grains. En association relais, la fertilisation organique apportée au printemps augmente la biomasse du blé et des adventices alors qu'elle pénalise

² Les légumineuses en place peuvent enrichir le sol en azote à partir des parties racinaires (phénomène de rhizodéposition). En interculture, les fauches du couvert peuvent être maintenues sur la parcelle ou exportées.

le développement des légumineuses. Le semis d'une légumineuse fourragère sous couvert de blé peut induire un meilleur contrôle des adventices durant l'association et surtout durant l'interculture suivante.

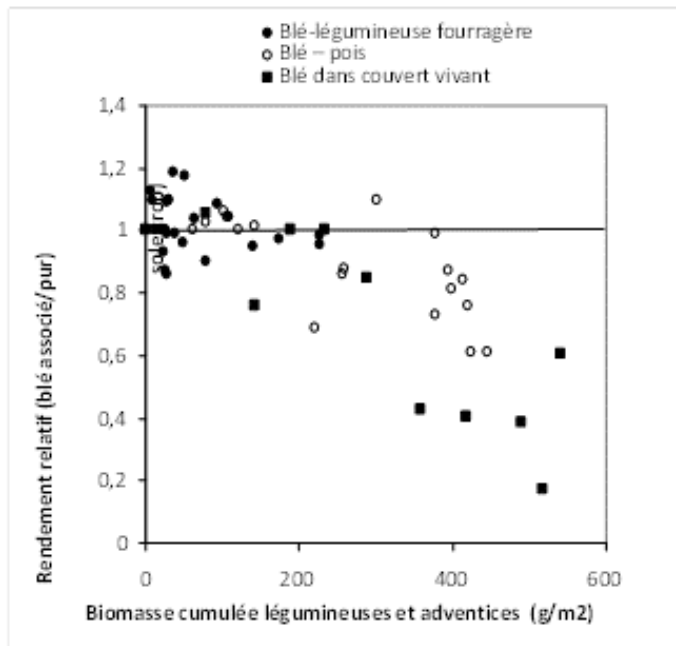


Figure 3 : Rendement relatif du blé associé comparativement au blé en culture pure en rapport avec la biomasse de légumineuses et d'adventices à la récolte du blé : présentation des trois modes d'association.

La densité de semis de la légumineuse et/ou son mode de contrôle avant implantation du blé (cas d'un couvert vivant) doivent être adaptés au niveau de fourniture d'azote disponible sur la parcelle afin de ne pas pénaliser le développement du blé. L'impact de ce type d'association est généralement positif sur la qualité du grain (teneur en protéines et gluten index) (Figure 4) ; l'augmentation de la teneur en protéines est par contre souvent associée à une diminution des rendements du blé implanté en couvert vivant.

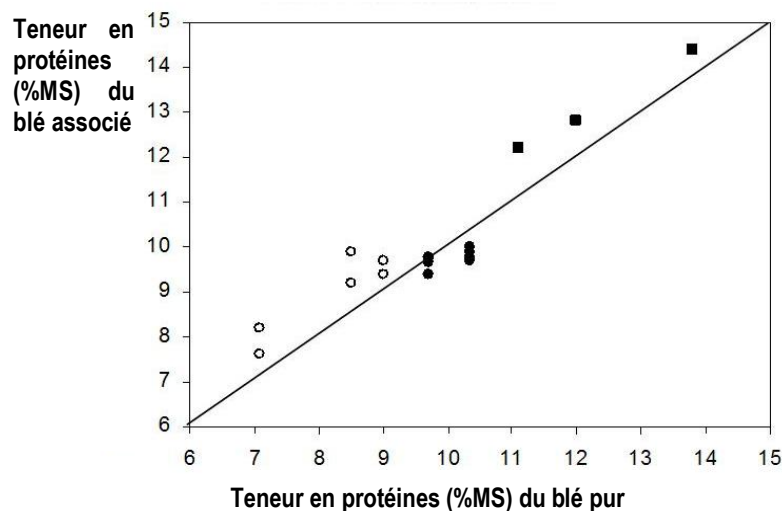


Figure 4 : Teneur en protéines du blé associé comparativement au blé en culture pure selon les trois modes d'association

³L'assèchement des feuilles du blé facilite l'interception de la lumière par les légumineuses implantées sous couvert

L'association en relais présente un avantage non négligeable en interculture mais aussi pour la culture suivante. En premier lieu, les légumineuses sous couvert contrôlent significativement les adventices. Par exemple en association relais, la biomasse des adventices en fin d'automne est au moins 9 fois supérieure quand le blé est semé en culture pure sans broyage ni déchaumage après récolte (Amosse *et al.*, 2013b). Les légumineuses sous couvert ont limité significativement la levée des espèces à levée printanière. Lors de la période d'interculture, le fort développement des trèfles blanc et violet a stoppé le développement des adventices. A l'inverse, la luzerne et la minette ont eu un effet moindre sur les adventices, expliqué par de plus faibles développements aériens durant l'interculture.

En couvert permanent, les légumineuses peuvent être soit pâturées soit récoltées en sec au cours de l'interculture. Le contrôle de leur développement permet de limiter la compétition sur les ressources hydriques et minérales avec la culture de vente. Ce couvert vivant peut être à nouveau utilisé sous maïs, sa présence facilite la portance et l'implantation du maïs en conditions humides.

Dans les expérimentations, les légumineuses implantées en relais sont enfouies au sol, même si leur utilisation fourragère est possible. En effet, les trèfles blanc et violet implantés en relais produisent au-delà de 3,5 T/MS.ha⁻¹ avant enfouissement en fin d'automne (Amosse *et al.*, Innovations Agronomiques n°32).

L'association de légumineuses en relais conduit à une forte restitution d'azote à la culture suivante. Les rendements en maïs, non fertilisé, sont fortement augmentés (+2 à 3t de grains/ha en moyenne) grâce à l'apport d'azote par les légumineuses (Amosse *et al.*, Innovations Agronomiques n°32). Les rendements en grains sont peu différents selon les types de légumineuses et ce malgré des niveaux d'absorption des parties aériennes variables. Les restitutions issues des parties racinaires et de la défoliation des légumineuses en cours de cycle (cas des légumineuses) augmentent la quantité d'azote disponible pour la culture suivante. Malgré de fortes quantités d'azote enfouies, la présence des légumineuses n'influence pas le niveau de lessivage entre la fin d'automne et l'émergence du maïs suivant, début mai (Amosse *et al.*, Innovations Agronomiques n°32).

En conclusion, les trois modes d'association blé-légumineuse répondent à des objectifs différents qui ne peuvent être appréhendés qu'à l'échelle de la succession culturale. Elles influencent différemment les performances du blé, son rendement et sa teneur en protéines. Ce projet a aussi montré que les variations de la teneur en protéines étaient liées à des équilibres différents entre les divers types de protéines du grain : gliadines, gluténines, protéines solubles. Cette variabilité de la composition protéique a aussi eu des répercussions sur la quantité de gluten extractible et sur ses propriétés rhéologiques (élasticité, extensibilité) ainsi que sur la qualité des pâtes boulangères. Toutefois, au-delà de cette observation, il n'a pas été possible dans tous les cas, d'identifier de facteur significatif à l'origine de ces variations. L'augmentation des performances du blé ne doit pas toutefois être le seul enjeu de ces associations. Les principaux bénéfices de ce type d'association sont un contrôle efficace des adventices et un enrichissement du sol en azote pendant la période d'association mais aussi pour les cultures suivantes; il s'agit aussi pour les associations où la légumineuse est aussi une culture de vente, d'un moyen pour sécuriser la production de protéagineux face à divers aléas biotiques et abiotiques.

3. Les leviers technologiques pour améliorer la productivité et la qualité des farines

3.1 Incidence des pratiques de mouture sur les qualités boulangère, nutritionnelle et sanitaire des farines

L'objectif était de mesurer l'influence du type de mouture sur la qualité technologique des farines produites à partir de blés issus de l'agriculture biologique. La comparaison de deux modes de broyage - sur meule de pierre et dans des appareils à cylindres - a permis d'étudier leur effet sur les propriétés nutritionnelles, sanitaires et organoleptiques de la farine. Cette comparaison a été opérée avec des

farines ayant des taux d'extraction différents, de 75 à 85%. L'expérimentation a été menée sur trois lots de blé (cultivar Orpic de type hard) issus de deux parcelles expérimentales implantées en 2008 et 2009 dans le département de l'Ain-France (Tableau 1). Les traitements sont réalisés sans azote supplémentaire (témoin ou avec un apport supplémentaire d'engrais organique de 60 unités par hectare (témoin+60 NU).

Tableau 1 - Principales caractéristiques des lots de blés testés en laboratoire

Caractéristiques des lots	2008		2009
	Témoin	Témoin + 60 NU	Témoin + 60 NU
Poids de mille grains (g MS)	37.1	40.8	36.4
PHI (kg/hl)	72.3	75.3	72.5
Vitrosité (%)	4	10	2
Cendres (% MS)	1.71	1.58	1.67
Taux de protéines (% MS)	9.6	12.6	11.5
DON (ppb)	110	274	290

Malgré le faible apport d'engrais organique (60 Unités), l'effet sur le taux de protéines est significatif. Chaque lot présente une très faible teneur en DON en deçà de la valeur seuil située à 500 ppb. Il se caractérise par un faible taux de vitrosité et une masse volumique réduite bien qu'Orpic soit classé dans le type hard.

Les expérimentations menées en laboratoire ont fait ressortir les résultats suivants :

Les techniques de broyage sur pierre conduisent à une teneur supérieure en produits issus de la couche à aleurone, ce qui est bénéfique pour la qualité nutritionnelle, grâce à une forte teneur en phytates et en minéraux. A l'inverse, ce type de broyage augmente le risque de contamination par les mycotoxines présentes dans les couches périphériques. Les farines issues d'un broyage sur meule de pierre conduisent à des volumes de pain peu élevés et ce quel que soit le taux d'extraction (Taupier-Letage *et al.*, 2008). L'ensemble des teneurs des farines (cendres, protéines, phytates, amidon endommagé) et des propriétés des farines et des pains (granulométrie des farines, volume des pains) issues d'un broyage sur meule de pierre montre une relative stabilité quel que soit le taux d'extraction.

Contrairement au broyage sur meule de pierre, le taux d'extraction des farines exerce une grande influence sur les caractéristiques des farines obtenues par broyage sur cylindres. A faible taux d'extraction (75%), les farines présentent une bonne qualité sanitaire, un volume de pain élevé et une très faible teneur en phytates et en cendres. L'augmentation du rendement en farine entraîne une augmentation de la qualité nutritionnelle associée à une dégradation rapide de la qualité sanitaire et boulangère (baisse du volume du pain). Il est possible d'obtenir des caractéristiques nutritionnelles similaires que celles obtenues sur meule de pierre en augmentant le taux d'extraction des moutures sur cylindre, et en y introduisant une étape de micronisation de certaines fractions de mouture (Rouau *et al.*, 2010). Alors que la mouture sur pierre se caractérise par une stabilité des propriétés des farines, la mouture sur cylindre est plus flexible pour accéder à des farines ayant des propriétés fonctionnelles et des densités nutritionnelles différentes.

Les propriétés des farines sont affectées par la méthode de mouture. Les farines issues d'un broyage sur meule de pierre sont plus fines, leur taux d'amidon endommagé est plus élevé et la capacité d'hydratation des farines est plus forte. L'augmentation du taux d'amidon endommagé peut être critique

pour la qualité des farines en provoquant une texture collante à la pâte. A l'inverse, à faible taux d'extraction (75%), la mouture sur meules permet d'augmenter la teneur en protéines des farines comparativement aux moutures sur cylindres (de 0,5% à 1,5%).

Bien que la teneur initiale en DON des lots testés soit faible, on note que la mouture sur cylindre à faible taux d'extraction (75%) est un moyen efficace pour limiter la contamination. A l'inverse, il semble particulièrement délicat de contrôler toute contamination par des broyages sur meule de pierre (Carcea *et al.*, 2012).

3.2 Incidence des pré-traitements des grains sur les qualités boulangère, nutritionnelle et sanitaire des farines

L'objectif visé est de tester des techniques de prétraitement des grains pour, d'une part, diminuer le risque contaminant pour les farines de meule et, d'autre part, améliorer la qualité boulangère des farines à fort taux d'extraction. Deux traitements ont été alors testés :

- le décorticage des grains par abrasion (soit 7% environ du poids de grain) des enveloppes périphériques afin d'éliminer les contaminants présents sur ces couches,
- le traitement des grains par l'ozone, suivant le procédé Oxygreen®, afin de détruire les contaminants et oxyder les constituants dont les protéines.

Les prétraitements du grain avant broyage (décorticage mécanique ou traitement par l'ozone) ne modifient pas le comportement des grains au cours de la mouture. On observe les mêmes différences entre les caractéristiques des farines suivant le système de mouture mis en œuvre. Cependant, ces prétraitements apparaissent très efficaces pour abaisser la teneur en DON (Rios *et al.*, 2009), notamment avec le processus de mouture sur meule de pierre. Afin de garantir la sécurité sanitaire au sein de la chaîne biologique, l'utilisation de prétraitements des céréales permettrait la production de farines biologiques sans contaminants, même pour des taux d'extraction élevés.

L'effet des prétraitements sur la qualité nutritionnelle et boulangère varie en fonction du type de mouture. Le décorticage augmente la qualité nutritionnelle des farines produites sur cylindres (augmentation de la teneur en cendres et en phytates) alors qu'il n'a aucun effet sur des farines produites à partir de meule de pierre. Ce traitement peut améliorer la qualité boulangère dans certaines conditions sans l'altérer par ailleurs. Le traitement par l'ozone conduit à une forte oxydation qui limite la levée et donc le volume du pain, ce qui dégrade la qualité boulangère. En conclusion, les prétraitements étudiés ont eu un effet très efficace sur le contrôle des contaminants. L'oxydation par l'ozone a même eu tendance à limiter la qualité boulangère, ce qui a conduit l'entreprise partenaire du programme à stopper sa demande d'agrément en AB.

Principales conclusions et perspectives

Le programme de recherche AGTEC-Orga eu pour principale originalité la combinaison des techniques et compétences issues de l'agronomie et de la technologie des céréales. Même si le temps alloué au projet n'a pas permis d'explorer suffisamment les mécanismes expliquant certains résultats, l'exploration de plusieurs pistes conduit à de nouvelles connaissances pertinentes, d'ores et déjà diffusées aux acteurs. Ainsi, nous avons souhaité produire, outre les articles scientifiques, des documents techniques faciles d'accès destinés aux acteurs de la filière. Ce projet a conduit à appréhender la qualité des blés AB non seulement à partir de la teneur en protéines, premier et parfois unique critère d'appréciation, mais aussi à partir de plusieurs critères décrivant la qualité tels que la quantité de gluten, l'indice de Zélny et la composition protéique. Les conclusions de ce projet devraient inciter les agriculteurs et acteurs de la filière à explorer de nouvelles pistes d'amélioration des performances. Il convient enfin de revoir les critères d'appréciation de la qualité des blés et farines en évitant de se limiter à l'unique teneur en protéines.

Références bibliographiques

- Amossé C., Jeuffroy M.-H., David C., 2013. Relay intercropping of legume cover crops in organic winter wheat: Effects on performance and resource availability. *Field Crop Research* 145, 78-87.
- Amossé C., Jeuffroy M.-H., Celette F., David C., 2013. Relay-intercropped forage legumes help to control weeds in organic grain production. *European Journal of Agronomy* 49, 158-167.
- Amossé C., Jeuffroy M.-H., Mary B., David C., sous presse. Contribution of relay intercropping with legume cover crops on nitrogen dynamics in organic grain systems. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*
- Amossé C., Jeuffroy M.-H., Celette F., David C., 2013. Association relais blé / légumineuse fourragère en système céréalier biologique : une réponse pour le contrôle des adventices et la nutrition azotée des cultures. *Innovations Agronomiques n°32*
- Arvalis Institut du végétal, 2013. Produire du blé tendre de qualité en agriculture biologique. 36p
- Bàrberi P., 2002. Weed management in organic agriculture: are we addressing the right issues? *WeedRes.* 42, 177-193.
- Carcea M., Narducci V., Abecassis J., Sansom M.F., Thomsen I.K., Celette F., David C., Dubois D., Friedel J.K., Hellou G., Hiltbrunner J., Gunst L., Maeder P., Mayer J., Messmer M., Peigne J., Stolze M., Schweinzer A., Surboeck A., 2012. Effetto dei trattamenti post-raccolta sulla contaminazione da DON nei prodotti di frumento tenero biologico europeo. 4° Congresso Nazionale Le micotossine nella filiera agro-alimentare. Roma. June 11-13, 2012.
- Casagrande M., David C., Valentin-Morison M., Makowski D., Jeuffroy MH., 2009. Factors limiting the grain protein content of organic winter wheat in south-eastern France: a mixed model approach. *Agron. Sustain. Dev.* 29, 565-574
- CGAAER., 2012. Rapport sur le bilan du plan de développement de l'agriculture biologique 2008-2012. 60 p + Annexes http://agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/2012-M084-01_Agriculture_bio__cle8f3f53.pdf
- Corre-Hellou G., Dibet A., Hauggaard-Nielsen H., Crozat Y., Gooding M., Ambus P., Dahlmann C., von Fragstein P., Pristeri A., Monti M., Jensen E.S., 2011. The competitive ability of pea-barley intercrops against weeds and the interactions with crop productivity and soil N availability. *Field Crop. Res.* 122, 264-272.
- David C., Abecassis J., Carcea M., Celette F., Friedel JK., Hellou G., Hiltbrunner J., Messmer M., Narducci V., Peigné J., Samson MF., Schweinzer A., Thomsen IK., Thommen A., 2012. Organic bread wheat production and market in Europe. *Sustainable Agriculture Reviews* 11, 43-62
- David C., 2009. Grandes cultures biologiques, des systèmes en équilibre instable. In: QUAE (Ed.), *Transitions vers l'agriculture biologique. Pratiques et accompagnements pour des systèmes innovants*, pp. 129-141.
- David C., Viaux P., Meynard JM., 2004. Les enjeux de la production de blé tendre en agriculture biologique. *Courrier de la cellule environnement de l'INRA* 51, 43-53
- European Commission., 2010. An analysis of the EU organic sector. 80p. http://ec.europa.eu/agriculture/markets-and-prices/more-reports/pdf/organic_2010_en.pdf
- Foissy D., Vian J.F., David C., 2013. Managing nutrient in organic farming system: Reliance on livestock production for nutrient management of arable farmland. Submitted at organic agriculture
- FranceAgriMer, 2011. Flash info bio Mars 2011. 2p.
- Hiltbrunner J., Jeanneret P., Liedgens M., Stamp P., Streit B., 2007a. Response of weed communities to legume living mulches in winter wheat. *J. Agron. Crop Sci.* 193, 93-102.
- Hiltbrunner J., Liedgens M., Bloch L., Stamp P., Streit B., 2007b. Legume cover crops as living mulches for winter wheat: Components of biomass and the control of weeds. *Eur. J. Agron.* 26, 21-29.
- Hiltbrunner J., Streit B., Liedgens M., 2007c. Are seeding densities an opportunity to increase grain yield of winter wheat in a living mulch of white clover? *Field Crop. Res.* 102, 163-171.
- Hiltbrunner J., Liedgens M., 2008. Performance of winter wheat varieties in white clover living mulch. *Biol. Agric. Hortic.* 26, 85-101.

- Holland J.M., 2004. The environmental consequences of adopting conservation tillage in Europe: reviewing the evidence. *AgrEcosyst Environ* 103, 1-25.
- Mäder P., Berner A., 2012. Development of reduced tillage systems in organic farming in Europe. *Renew Agr Food Syst* 27, 7-11
- Nowak B., Nesme T., David C., Pellerin S. in revision. Disentangling the drivers of fertilising material inflows in organic farming. Nutrient cycling in agroecosystems (Submitted in April 2012)
- Peigné J., Ball B., Roger-Estrade J., David C., 2007. Is conservation tillage suitable for organic farming? A review. *Soil Use Manag* 23, 129-144.
- Peigné J., Vian J.F., Cannavaciolo M., Lefevre V., Gautronneau Y., Boizard H., 2013. Assessment of soil structure in the transition layer between topsoil and subsoil using the profil cultural method. *Soil Till Res.* 127, 13-25.
- Peigné J., Messmer M., Aveline A., Berner A., Mäder P., Carcea M., Narducci V., Samson M.F., Thomsen I.K., Celette C., David C., 2013. Wheat yield and quality as influenced by reduced tillage in organic farming. *Organic agriculture* (in press)
- Rolland B., Le Campion A., Oury F.X., 2012. Pourquoi sélectionner de nouvelles variétés de blé tendre adaptées à l'agriculture biologique ? *Courrier de l'environnement de l'INRA.* 62, 71-85
- Rios G., Pinson-Gadais L., Abecassis J., Zakhia N., Lullien-Pellerin, S V. 2009. Assessment of dehulling efficiency to reduce deoxynivalenol and Fusarium level in durum wheat grains. *Journal of Cereal Science*, 49 (3): 387-392.
- Roaux X., Mateo-Anson N., Barron C., Chaurand M., Lullien-Pellerin V., Mabillet F., Samson M.F., Abecassis J., Hemery Y. 2010. Effet des procédés de fractionnement sur la composition et quelques propriétés nutritionnelles des produits céréaliers. *Cahiers de Nutrition et de Diététique*, 45 (5): 230-236.
- Taupier-Letage B., Abecassis J., Viaux P., Fontaine L., 2008. Qualité des blés biologiques et qualité nutritionnelle et organoleptique Rapport final programme Pain Bio. 27p
- Thomsen I.K., Samson M.F., Carcea M., Narducci V., 2011. The influence of long-term inputs of catch crops and cereal straw on yield, protein composition and technological quality of a spring and a winter wheat *International Journal of Food Science and Technology* 46, 216-22