

Associations blé-pois: du fonctionnement au raisonnement de la conduite

Christophe NAUDIN¹ ; Guénaëlle CORRE-HELLOU¹

UP120 LEVA (Légumineuses, Écophysiologie Végétale, Agroécologie) - SFR 4207 QUASAV
ESA (École Supérieure d'Agricultures - Angers Loire) - Membre de l'Université Bretagne Loire
55 rue Rabelais - BP 30748 - 49007 Angers Cedex 01 (FRANCE)

Les associations de cultures consistent en la culture simultanée d'au moins deux espèces végétales sur la même parcelle (Willey 1979). Leur premier objectif est d'optimiser l'utilisation des ressources (en particulier la lumière, l'eau et les nutriments). Les associations culturales varient principalement selon trois critères : les espèces, leur implantation spatiale et la densité de culture. On peut relever quatre types d'agencement spatial (Andrews and Kassam 1976): l'association en mélange grâce à une répartition aléatoire des plantes par mélange des semences dans le semoir ; l'association par rang par un semis des espèces avec alternance des rangs, l'association par bandes par une alternance de bandes assez larges d'une même espèce pour permettre des interventions indépendantes ; l'association en relais où les espèces ont des cycles de culture qui ne sont pas synchronisés et se chevauchent (se différenciant des associations simultanées semées en même temps et récoltées à la même période). Enfin, les densités de semis des deux espèces distinguent les associations en deux catégories : substitutives où la densité de semis de chaque espèce est raisonnée en pourcentage de la densité optimale en culture pure, de sorte que la somme de ces pourcentages soit égale à 100; additives où la densité totale dépasse les proportions optimales.

Focus sur la partage des ressources azotées : cas des associations simultanées annuelles céréales-légumineuses

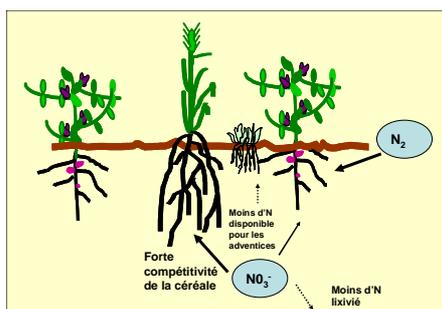


Figure 1 : Dynamique simplifiée de l'azote au sein d'une association céréale-légumineuse.

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 (Corre-Hellou et al. 2006). Les LER (Land Equivalent Ratio) calculés sur la quantité d'N accumulés peuvent atteindre 1,5 pour de faibles disponibilités en N minéral dans le milieu, indiquant qu'un hectare d'associations accumule autant d'azote qu'1,5 ha d'une combinaison de cultures pures (soit une hausse de productivité de 50% !). 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 (Corre-Hellou et al. 2011).

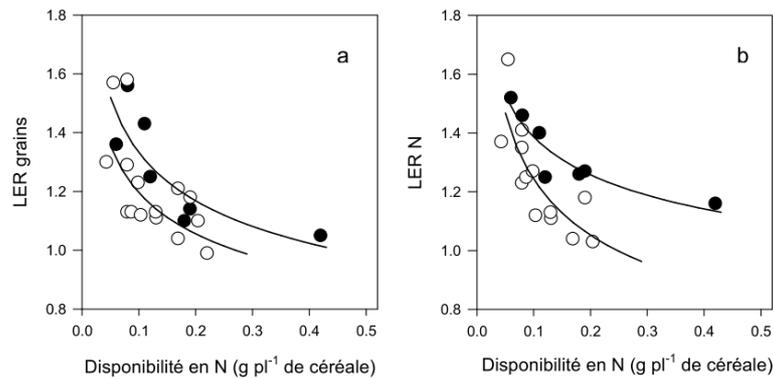


Figure 2 : Effet de la disponibilité en N par plante de céréale sur le LER grains (a) et le LER N (b). LER grains = rendement pois associé / rendement pois pur + rendement céréale associée / rendement céréale pure LER N = quantité d'azote accumulé pois associé / quantité d'N accumulé pois pur + quantité d'azote accumulé céréale associée / quantité d'N accumulé céréale pure Données acquises en station expérimentale en agriculture conventionnelle sur des associations pois-orge de printemps () et pois-blé d'hiver (o). Régressions pour LER grains : $y=0.86x-0.19$ ($R^2=0.71$) (pois-orge) et $y=0.79x-0.18$ ($R^2=0.46$) (pois-blé) ; pour LER N : $y= 1.0x-0.14$ ($R^2=0.86$) (pois-orge) et $y=0.71x-0.24$ ($R^2=0.68$). (d'après Corre-Hellou et al., 2006 ; Corre-Hellou, 2012).

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. En raison de la forte compétitivité de la céréale pour l'azote du sol, la disponibilité en azote minéral pour le pois est plus faible qu'en culture pure ; le pois repose alors davantage sur la fixation symbiotique pour assurer ses besoins (%Ndfa) en association avec une céréale qu'en culture pure même lors d'un apport d'azote sur l'association (Corre-Hellou et al. 2006; Naudin et al. 2010).

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 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 (Naudin et al. 2010).

Inhibition et capacités de réversibilité en fonction du stade d'exposition

Des **expérimentations de plein champ** (Naudin et al. 2010) mettent en évidence un effet de la date de l'apport azoté sur le fonctionnement de l'appareil fixateur :

- dans le cas d'un apport très précoce (dès la fin de l'hiver) et en comparaison d'une association non fertilisée, le blé, plus compétitif pour les ressources d'azote minéral du sol, voit sa biomasse augmentée et exerce ainsi une plus forte compétition aérienne sur le pois. Il en résulte une diminution de la biomasse de pois et donc une diminution de la quantité d'azote total accumulée par le pois, sans pour autant diminuer la contribution de l'azote issu de la fixation dans l'azote total accumulé.

- dans le cas d'un apport tardif (vers début de remplissage des grains du pois), la croissance du pois est moins affectée que dans le cas d'un apport précoce intervenant durant les phases végétatives du pois. L'apport azoté intervient à un stade où le pois a encore une forte demande en azote alors que le blé est moins compétitif. Le pic de nitrate dans le sol inhérent à la fertilisation azotée inhibe durablement l'activité de la fixation du pois. Le pois satisfait alors sa demande en azote principalement à partir de l'absorption racinaire. On observe donc une forte diminution de la contribution de l'azote fixé à l'azote total accumulé par le pois par rapport à un apport précoce (graphe I de la Figure 3). Lors d'un apport tardif, la quantité d'azote total accumulé par le pois tend à être supérieure en comparaison d'un apport précoce (graphes III de la Figure 3). La quantité d'azote fixé, résultante du produit entre quantité totale d'azote et taux de fixation, est similaire quelle que soit la date de l'apport (graphes II de la Figure 3).

Ces apports d'azote (45 kg N ha^{-1}) réalisés en plein champ sur associations pois-blé à différentes dates conduisent à exposer les pois associés à une courte exposition aux nitrates. En effet, la quantité d'azote minéral dans le sol est rapidement absorbée par le couvert associé et sa quantité décroît rapidement après apport sous le

seuil d'inhibition précédemment mis en évidence par les équipes de l'INRA de Dijon (Voisin et al., 2002). Dans les 30 premiers centimètres de sol, après apport d'azote, la quantité d'azote minéral passe sous le seuil d'inhibition de 40 kg N ha^{-1} , généralement sous environ une quinzaine de jours après l'apport. Ainsi, les régimes de fertilisation testés sur nos expérimentations reviennent à induire une courte exposition aux nitrates. Les expérimentations en conditions contrôlées ont été mises en place afin d'approfondir, à l'échelle de la plante de pois, les mécanismes en jeu dans une telle situation.

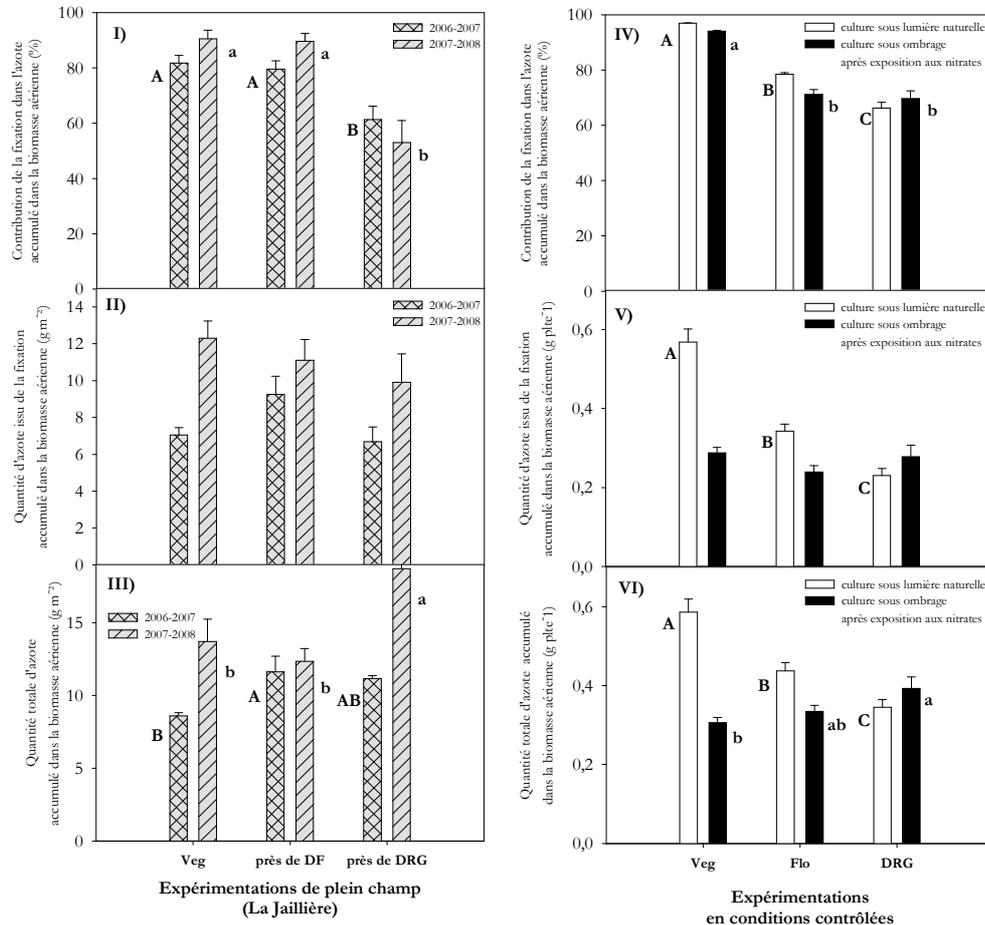


Figure 3 : Contribution de la fixation dans l'azote total accumulé dans la biomasse aérienne du pois, quantité d'azote fixée accumulé dans les parties aériennes, et quantité totale d'azote accumulé dans les parties aériennes : Résultats cumulés observés en fin de cycle du pois. (Naudin 2009). Période d'exposition aux nitrates : Veg (stades végétatifs), Flo (floraison du pois), DF (début de floraison), DRG (début de remplissage des grains). Une analyse de variance (somme des carrés de type III, $\alpha=5\%$) a été réalisée afin de tester un effet date d'exposition aux nitrates. Les traitements avec les mêmes lettres de même casse, ou sans lettres, ne sont pas significativement différents (Test HSD de Tukey, $\alpha=5\%$).

Des **expérimentations en conditions contrôlées** (Naudin et al. 2011) ont mis en évidence que plus la date d'exposition aux nitrates était tardive, et plus la contribution de l'azote fixé dans l'azote total accumulé dans les parties aériennes était diminuée, et ce, quelle que soit la disponibilité en photosynthétats après retrait des nitrates (graphe IV de la figure 3).

Pour les plantes cultivées sous lumière naturelle, la quantité d'azote fixé accumulée dans les parties aériennes (graphe V de la figure 3), tout comme la quantité d'azote total accumulée dans les parties aériennes (graphe VI de la figure 3), décroît significativement au fur et à mesure que la date d'exposition aux nitrates est tardive.

Dans le cas d'une culture sous ombrage après retrait des nitrates, la quantité d'azote fixé n'est pas modifiée par la date d'exposition aux nitrates, alors que la quantité totale d'azote accumulée dans les parties aériennes augmente avec des dates d'exposition plus tardives.

Les très fortes différences de conditions de cultures en serre en comparaison des conditions de plein champ (hydroponie vs substrat de terre, climat contrôlé vs climat incontrôlé, différences de variétés, etc) ne permettent pas une transposition directe des résultats mais des tendances communes dans les résultats peuvent être mises en évidence. En effet, dans les expérimentations en serre, on retrouve le même effet dépressif sur le taux de fixation d'un apport à DRG que celui observé en champ (graphes I et IV de la figure 3). Au final, ces expérimentations

de plein champ comme ces expérimentations en conditions contrôlées ont démontré que la fixation symbiotique du pois était réversible après une courte phase d'inhibition liée à la présence de nitrate mais que cette réversibilité n'était possible que si l'exposition au nitrate intervenait avant le stade de début du remplissage des grains.

Effet tampon de la fixation symbiotique par rapport aux ressources azotées

Cette capacité du pois à exploiter les deux voies de nutrition azotée en fonction des disponibilités en azote minéral dans le milieu permet d'obtenir une bonne efficacité d'utilisation de l'apport azoté notamment à des dates tardives (diminution des risques de lixiviation liées à une faible valorisation) et confirme de précédentes observations. Ainsi, dans nos expérimentations, aucune différence significative n'a été observée entre les reliquats d'azote minéral du sol observés à la récolte après blé pur fertilisé ou après associations, quelle que soit la conduite azotée appliquée aux associations (Naudin et al. 2010). Cependant ceci reste à confirmer pour des niveaux de doses plus élevés.

Performance agronomiques et environnementales d'associations annuelles céréales-légumineuses

Dans une association blé-pois avec un faible apport de 45 kg d'N ha⁻¹ au stade épi 1cm, l'association produit davantage de pois et autant de blé avec deux fois moins d'azote que si on cultivait les deux espèces séparément avec une conduite de fertilisation classique (selon la méthode du bilan) pour le blé pur (Naudin 2009, Naudin et al., 2010). La quantité d'azote apporté par les engrais par tonne de grains de blé récolté est environ de 23 kg en culture pure et 11 kg en culture associée. Ces bénéfices de l'association se manifestent aussi en réduction des impacts environnementaux négatifs. La méthode d'Analyse de Cycle de Vie a été mise en œuvre afin d'évaluer les impacts environnementaux potentiels des associations en comparaison à des cultures pures de blé tendre d'hiver et de pois protéagineux d'hiver pour les catégories d'impacts « changement climatique », « demande en énergie », eutrophisation » et « occupation des terres » (Le Breton 2011, Naudin et al., 2014). Cette évaluation a été réalisée pour des stratégies de conduites et d'insertion de mélanges blé-pois d'hiver définies à dire d'experts, et adaptées aux régions Pays-de-la-Loire et Normandie (Le Breton, 2011). Les associations blé-pois permettent de produire autant voire plus que les cultures pures de blé et de pois tout en garantissant un produit de qualité et cela avec moins d'intrants qu'en culture pure. Une réduction des intrants permet aux associations biologiques d'afficher une rentabilité très intéressante en comparaison aux cultures pures. D'autre part, comparées à des combinaisons de cultures pures qui produisent les mêmes quantités à l'hectare, les associations présentent des impacts environnementaux potentiels inférieurs aux cultures pures, quelle que soit la catégorie d'impacts considérée. A production équivalente, une association blé-pois a des impacts d'environ 30 à 60% inférieurs aux cultures pures concernant le changement climatique (émissions de GES) et la demande en énergie. A surface équivalente, l'association réduit l'eutrophisation jusqu'à 77% dans certains systèmes testés.

Pour des associations récoltées en fourrage, dans un réseau d'essais national, nous observons des résultats similaires qu'en production de grains. Ainsi une forte réduction de la proportion de pois est observée dans le mélange pour les parcelles ayant des reliquats élevés. Un apport d'azote au stade épi 1cm impacte aussi cette proportion. Il augmente le rendement de la céréale et réduit celui du pois. Un apport au stade « dernière feuille » sur des parcelles à fort reliquat impacte peu le rendement de chaque espèce mais augmente la teneur en MAT (matières azotées totales).

Une combinaison de leviers en fonction des objectifs visés

Dans le cadre du réseau de 20 parcelles d'association céréale - légumineuse suivi en Poitou Charentes au cours du CASDAR 8058 (Corre-Hellou et al. 2013), il ressort que la préoccupation majeure des agriculteurs concerne la proportion dans le mélange des espèces pour obtenir un fourrage riche en protéines, avec un bon rendement. Cette préoccupation ressort sur la plupart des témoignages analysés, pour la production de grains ou de fourrages. Les agriculteurs essaient donc d'adapter la fertilisation azotée en fonction de la densité du mélange en place. Des expérimentations de plein champ ont démontré que la fertilisation azotée était un levier efficace pour gérer la proportion de chaque espèce dans le mélange (Naudin et al. 2010). Un apport d'azote favorise la croissance du blé et pénalise celle du pois du fait que la céréale apparaît plus compétitive que la légumineuse pour les ressources d'azote minéral du sol, pour une date d'apport intervenant avant le début du remplissage des grains du pois. Cependant, l'intensité de la réponse à la date de fertilisation varie en fonction des écarts de dynamiques de croissance et de phénologie de chaque espèce au moment de l'apport, facteurs qui apparaissent déterminants dans le partage de l'azote minéral et le comportement de la fixation symbiotique (Naudin et al. 2010). Par ailleurs, la fertilisation azotée entraîne une courte inhibition de la fixation symbiotique, qui est réversible si l'apport intervient avant la floraison du pois (Naudin et al. 2010; Naudin et al. 2011). Au final, la fertilisation azotée apparaît comme un outil intéressant pour le pilotage de la proportion des espèces dans la biomasse de l'association, mais peut réduire la quantité d'azote fixée par l'association qui est corrélée au niveau de biomasse du pois.

Au-delà de l'effet des différents leviers, c'est bien une combinaison de pratiques qui permet de piloter la proportion d'espèces à la récolte en fonction des objectifs visés (Figure 4) (Naudin 2009; Naudin et al. 2010). Ainsi, pour un objectif de production d'un mélange à destination fourragère (récolte en ensilage ou en grains), c'est un équilibre entre la céréale (contribuant d'abord à l'apport en énergie) et la légumineuse (contribuant à l'apport en matières azotées totales) qui est recherché. Il est alors recommandé de semer chacune des deux espèces à des densités proches de la moitié des densités pratiquées en cultures pures et de ne pas réaliser d'apport azoté. Si l'agriculteur cherche à produire un blé de qualité meunière avec moins d'intrants azotés, les densités de semis et le choix de la variété de céréale (forts potentiels de tallage et de hauteur) doivent favoriser la céréale au détriment de la légumineuse dès la mise en place du couvert. Une fertilisation azotée réduite (estimée selon la méthode du bilan avec des besoins calculés au prorata de la densité relative de céréale dans le mélange) apportée au début de la montaison de la céréale contribuera également à conforter voire augmenter la proportion de céréale dans le mélange à la récolte. A l'inverse, dans le cas d'un objectif de production de légumineuse avec moins de facteurs limitants que ceux souvent subis en cultures pures, la stratégie est de favoriser la légumineuse dès l'implantation par un semis à une densité relative élevée comparativement à celle de la céréale. Dans ce cas, on privilégiera une variété de céréale ayant un moindre potentiel de compétition (faibles potentiels de tallage et de hauteur) et aucune fertilisation azotée ne devra être pratiquée.

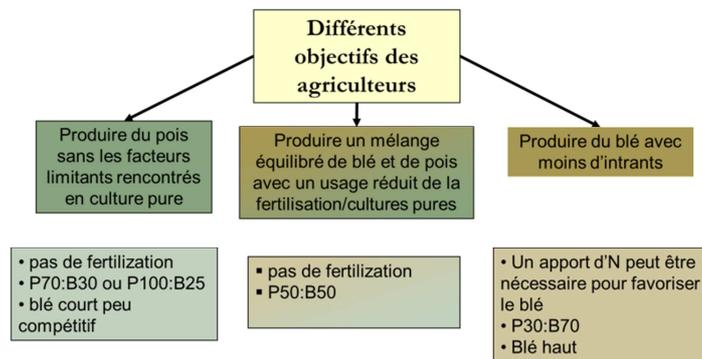


Figure 4 : Propositions de conduites sur les associations céréales-légumineuses en fonction des objectifs de production visés.

Références bibliographiques

- Andrews DJ, Kassam AH (1976) The importance of multiple cropping in increasing world food supplies. R.I. Papendick et al. (ed.), Am. Soc. Agron., Madison, WI, pp 1-11
- Corre-Hellou G, Fustec J, Crozat Y (2006) Interspecific competition for Soil N and its interaction with N₂ fixation, leaf expansion and crop growth in pea-barley intercrops. *Plant and Soil* 282: 195-208
- Corre-Hellou G, Dibet A, Hauggaard-Nielsen H, Crozat Y, Gooding M, Ambus P, Dahlmann C, von Fragstein P, Pristeri A, Monti M, Jensen ES (2011) The competitive ability of pea-barley intercrops against weeds and the interactions with crop productivity and soil N availability. *Field Crops Research* 122: 264-272
- Corre-Hellou, G. (2012). Fonctions des légumineuses et interactions biotiques pour des systèmes de culture annuels plus durables (Les associations d'espèces annuelles à base de légumineuses : objet de complémentarité entre espèces et de facilitation entre disciplines et entre acteurs). *gronomic sciences*. Angers, LUNAM Université. Mémoire d'Habilitation à la Direction des Recherches, p 84.
- Corre-Hellou G, Bédoussac L, Bousseau D, Chaigne G, Chataigner C, Celette F, Cohan J-P, Coutard JP, Emile JC, Floriot M, Foissy D, Guibert S, Hemptinne JL, Le Breton M, Lecompte C, Marceau C, Mazoué F, Mérot E, Métivier T, Morand P, Naudin C, Omon B, Pambou I, Pelzer E, Prieur L, Rambaut G, Tauvel O (2013) Associations céréale-légumineuse multi-services. *Innovations Agronomiques* 30: 41-57
- Le Breton M (2011) Evaluations multicritères d'itinéraires techniques d'associations culturales céréale-légumineuse. Mémoire de fin d'étude d'Ingénieur en Agriculture Groupe ESA (Angers, France) ;pp.268. (sous la direction de G Corre-Hellou & C Naudin)
- Naudin C (2009) Nutrition azotée des associations pois-blé d'hiver (*Pisum sativum* L. – *Triticum aestivum* L.) : Analyse, Modélisation et Propositions de stratégies de gestion. *Sciences Agronomiques*. Université d'Angers, Angers, France, p 119
- Naudin C, Corre-Hellou G, Pineau S, Crozat Y, Jeuffroy M-H (2010) The effect of various dynamics of N availability on winter pea-wheat intercrops: Crop growth, N partitioning and symbiotic N₂ fixation. *Field Crops Research* 119: 2-11
- Naudin C, Corre-Hellou G, Voisin A-S, Oury V, Salon C, Crozat Y, Jeuffroy M-H (2011) Inhibition and recovery of symbiotic N₂ fixation by peas (*Pisum sativum* L.) in response to short-term nitrate exposure. *Plant and Soil* 346: 275-287
- Naudin C, van der Werf HMG, Jeuffroy MH, Corre-Hellou G (2014) LCA applied to pea-wheat intercrops: a new method for handling the impacts of co-products. *Journal of Cleaner Production*, 73:80-87. doi: 10.1016/j.jclepro.2013.12.029
- Voisin A-S, Salon C, Munier-Jolain NG, Ney B (2002) Quantitative effects of soil nitrate, growth potential and phenology on symbiotic nitrogen fixation of pea (*Pisum sativum* L.). *Plant and Soil* 243: 31-42
- Willey RW (1979) Intercropping - Its importance and research needs. Part 1. Competition and Yield advantages. *Field Crops Abstr.* 32: 1-10