



Identification d'idéotypes variétaux pour la gestion des adventices : Exemple du pois associé au blé

Nathalie Colbach, Judith Burstin, Delphine Moreau

► To cite this version:

Nathalie Colbach, Judith Burstin, Delphine Moreau. Identification d'idéotypes variétaux pour la gestion des adventices : Exemple du pois associé au blé. *Innovations Agronomiques*, 2025, 101, pp.60-73. 10.17180/ciag-2025-vol101-art06 . hal-05029433

HAL Id: hal-05029433

<https://hal.inrae.fr/hal-05029433v1>

Submitted on 10 Apr 2025

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

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



Distributed under a Creative Commons CC BY-NC-ND 4.0 - Attribution - Non-commercial use - No Derivative Works - International License



Identification d'idéotypes variétaux pour la gestion des adventices : Exemple du pois associé au blé

Nathalie COLBACH¹, Judith BURSTIN¹, Delphine MOREAU¹

¹ Agroécologie, INRAE, Institut Agro, Univ. Bourgogne, Univ. Bourgogne Franche-Comté, 21000 Dijon

Correspondance : Nathalie.Colbach@inrae.fr

Résumé

Associer le pois (*Pisum sativum* L.) au blé (*Triticum aestivum* L.) peut réduire l'infestation et les dommages causés par les adventices. Nous avons mené des expériences virtuelles avec le modèle FLORSYS afin d'identifier, en fonction du dispositif d'association et de la flore adventice, (1) les paramètres-clé du pois (traits) qui déterminent le rendement et le contrôle des adventices dans les associations pois-blé, (2) les combinaisons optimales des valeurs des paramètres du pois et du blé, ainsi que les techniques culturales de l'association, pour maximiser ces objectifs. Les simulations ont inclus des variétés existantes (5 pois et 3 blé) et virtuelles (5 et 10). Les associations ont réduit la perte de rendement du pois due aux adventices (de 30 % pour la variété la moins tolérante aux adventices) et l'infestation du champ (14 %). Un rendement élevé en pois dans les associations infestées d'adventices nécessite une variété de pois à haut potentiel de rendement, une variété de blé suppressive des adventices, et des techniques culturales préventives des adventices. Les résultats ont été synthétisés dans des tableaux de conseils.

Mots-clés : association céréale-légumineuse, adventice, trait, perte de rendement, idéotype, régulation biologique

Abstract: Identifying crop ideotypes for weed management – case study of pea intercropped with wheat

Intercropping pea (*Pisum sativum* L.) with cereals is a promising lever to reduce weed infestation and damages. This study ran virtual experiments with the FLORSYS model to identify, depending on the intercropping design and weed flora, (1) the key pea parameters (traits) that drive crop production and weed control in pea intercropped with wheat (*Triticum aestivum* L.), (2) optimal combinations of pea and wheat parameter values, and intercrop management techniques, to maximise these goals. Simulations included existing (5 pea and 3 wheat) and virtual varieties (5 and 10). Intercropping reduced pea yield loss due to weeds (by 30% for the least weed-tolerant variety) and field infestation (14%). A high pea yield in weed-infested intercrops needs a pea variety with a high yield potential, a weed-suppressive wheat variety and weed-preventive management techniques. Results were summarized in advice tables.

Keywords: cereal-legume intercrop, weed; trait; yield loss; yield gap; ideotype; biological regulation

1. Introduction

Dans le contexte actuel de réduction des pesticides se pose la question de la gestion des adventices (« mauvaises herbes ») qui sont le bioagresseur le plus nuisible pour la production des systèmes de culture arables tempérés (Oerke 2006). La diversification des cultures est un levier crucial pour la régulation biologique des adventices (Weisberger et al. 2019), et associer des céréales comme le blé (*Triticum aestivum* L.) à des légumineuses permet notamment de protéger des espèces comme le pois (*Pisum sativum* L.) peu compétitrices face aux adventices (Verret et al. 2017; Gu et al. 2021). Choisir des variétés de pois adaptées rendrait une telle association encore plus efficace, en termes de potentiel de rendement (c'est-à-dire, le rendement en l'absence de bioagresseurs et en présence de ressources du sol non-limitantes) et de gestion des adventices.



La suppression des adventices est la capacité d'une culture à réduire la biomasse des adventices et/ou la production de graines d'adventices (Worthington et Reberg-Horton 2013; Zerner et al. 2016). L'autre composante de la compétitivité des cultures vis-à-vis des adventices est la tolérance aux adventices, c'est-à-dire la capacité à produire un rendement élevé ou une faible perte de rendement en présence d'adventices (Lemerle et al. 2006; Zerner et al. 2016). Les caractéristiques qui rendent le pois compétitif par rapport aux adventices ont été étudiées dans le cas du pois en culture pure (Jacob et al. 2017; Colbach et al. 2022) mais pas en culture associée. Les interactions interspécifiques, que ce soit avec d'autres cultures ou les adventices, sont en effet généralement ignorées pendant la sélection variétale (Kammoun et al. 2021; Kiær et al. 2022).

La sélection au champ de variétés de pois compétitives vis-à-vis des adventices, pour la culture en association, serait coûteuse car elle demanderait de tester de nombreuses combinaisons de variétés dans différents pédoclimats, systèmes de culture et flores adventices. Il est également notoirement difficile d'estimer correctement la perte de rendement des cultures due aux adventices, car il est pratiquement impossible de garantir un témoin continuellement exempt d'adventices pour mesurer le rendement potentiel (Colbach et al. 2020), ou d'assurer une infestation homogène d'adventices. Même si les modèles sont une représentation imparfaite de la réalité, ils (en particulier ceux basés sur des processus mécanistes) facilitent l'identification des facteurs limitants, des traits de culture et des idéotypes pertinents, ainsi que la prise en compte des interactions entre le génotype, l'environnement et le système de culture (Jeuffroy et al. 2014). Les modèles facilitent également la discrimination des deux composantes de la compétitivité vis-à-vis des adventices, à savoir la tolérance et la suppression des adventices. Les idéotypes sont des plantes cultivées idéales théoriques, qui combinent les valeurs des traits pour optimiser la performance de la culture dans un environnement particulier, la gestion de la culture et l'utilisation finale (Martre et al. 2015).

L'objectif de cette étude était d'utiliser le modèle FLORSYS (Colbach et al. 2019; Colbach et al. 2021) (Colbach et al. 2024) pour identifier les traits du pois et du blé (correspondant aux paramètres du modèle) qui rendent leurs associations compétitrices face aux adventices, dans différents scénarios de gestion. FLORSYS est actuellement le modèle le plus complet pour évaluer l'impact des cultures, variétés et techniques culturales sur les adventices, et les conséquences pour la production des cultures et la biodiversité. L'étude s'est concentrée sur le pois, moins compétiteur que le blé (Corre-Hellou et al. 2011; Gu et al. 2021) et sur la ressource pour laquelle cultures et adventices concourent le plus dans les systèmes de culture fertilisés des régions tempérées, à savoir la lumière (Colbach et al. 2023). Les paramètres du modèle considérés ici sont des traits indépendants des conditions environnementales (Tardieu 2003). Ils ne varient qu'avec l'espèce et/ou la variété cultivée et caractérisent leurs propriétés intrinsèques. Par exemple, la hauteur de la plante par unité de biomasse au début de la floraison dans des conditions non stressées (i.e. ressources non limitées et absence de compétition par les plantes voisines) est une valeur de paramètre constante pour une espèce/variété donnée, contrairement à la hauteur de la plante au début de la floraison, qui dépend des conditions de croissance.

2. Tester des variétés réelles et virtuelles avec un modèle

Les simulations de cette étude (Colbach et al. in revision) ont été réalisées avec le modèle "parcelle virtuelle" FLORSYS qui simule la compétition pour la lumière entre plantes (qu'elles soient adventices ou cultivées), la dynamique de la flore adventice sur le long terme et son impact sur la production agricole en fonction des systèmes de culture et du pédoclimat (Colbach et al. 2019; Colbach et al. 2021; Colbach et al. 2024). Ce modèle permet ainsi de tester de nombreux et divers systèmes de culture à long terme et avec différentes flores adventices, conditions météorologiques et types de sol.

Au début de l'étude, 7 variétés de pois (dont 5 d'hiver) et 3 variétés de blé d'hiver étaient paramétrées dans FLORSYS, à partir d'expérimentations au champ et en conditions contrôlées. Pour étendre la diversité des variétés étudiées, 5 variétés virtuelles de pois d'hiver et 10 de blé ont été créées en faisant varier les valeurs des paramètres mesurés sur les variétés existantes, tout en respectant les corrélations entre paramètres pour éviter des aberrations biologiques (voir la méthode dans Colbach et al. 2022).



3600 systèmes de culture incluant des associations combinant une des 10 variétés de pois d'hiver et une des 13 variétés de blé ont été simulés sur 12 ans, partant d'un fort salissement initial par les adventices. Ces systèmes sont contrastés en termes d'usage d'herbicide, travail du sol, rotations, et flore adventice. Chaque système de culture est répété 5 fois avec différents enregistrements météorologiques de Dijon. Les dispositifs des associations sont substitutifs, additifs ou « incomplet » : un dispositif substitutif sème x % de la densité de semis en pure de la première espèce et $(100 - x)$ % de la densité en pure de la deuxième espèce. Dans un dispositif additif, la somme des densités relativement aux cultures en pur dépasse 100 % et dans un dispositif incomplet, la somme est moins de 100 %.

La même étude de simulation a été réalisée en remplaçant les associations pois-blé par du pois en pur (Colbach et al. 2022), ce qui permet d'évaluer les bénéfices et inconvénients du passage du pois pur à une association. Les densités de semis du pois en pur variaient autant que dans les associations. La comparaison des performances des associations à celles des cultures en pur pouvait ainsi discriminer l'effet de l'association de celui de la réduction de la densité de semis (Lebreton et al. 2024).

3. Compromis entre production de pois et production de blé

En l'absence d'adventices, les variétés de pois produisant un fort rendement de pois sont aussi celles qui produisent un faible rendement de blé, et vice-versa (Figure 1). Ce compromis entre rendement du pois et rendement du blé est obtenu aussi bien pour les variétés réelles que les variétés virtuelles. En moyenne, pour chaque t/ha de rendement additionnel de blé, le pois perd 0.5 t/ha.

Certaines variétés se détachent de cette relation. La variété Isard produit à la fois le meilleur rendement de pois, et permet un rendement de blé moyen. Par rapport à Isard, le rendement de pois est divisé par deux pour la variété China, malgré un rendement de blé plus faible.

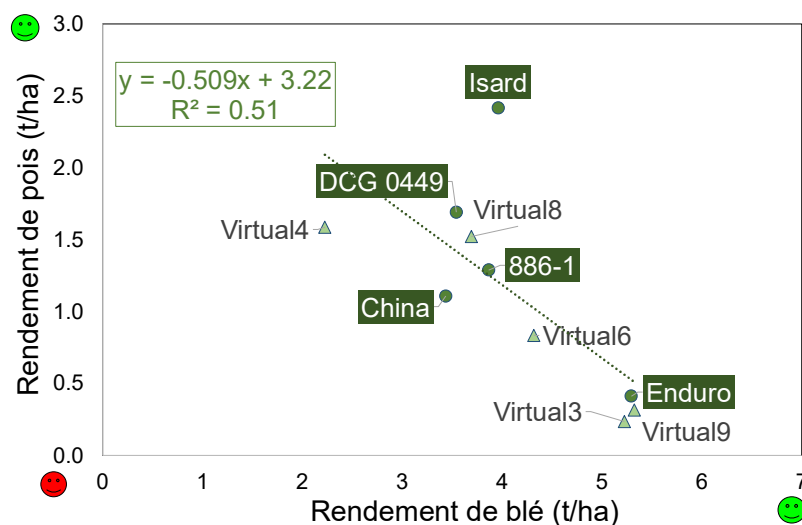


Figure 1 : Compromis entre rendement de pois et rendement de blé dans les associations pois-blé en l'absence d'adventices, en fonction des variétés de pois existantes et virtuelles. Moyennes de 3 600 systèmes de culture x 5 répétitions météo simulés avec FLORSys sur 12 ans (basé sur Colbach et al. in revision)

4. La contribution de l'association pois-blé pour gérer les adventices

4.1 Le blé est plus compétitif que les adventices

En l'absence d'adventices et en moyenne sur toutes les densités de semis, associer le blé avec du pois fait chuter le rendement du blé de 41 % en moyenne sur toutes les variétés, comparé au blé en pur, alors que les densités de blé en association étaient en moyenne les mêmes qu'en pur dans les simulations. La perte de rendement du pois due à l'association avec le blé est bien plus élevée, avec 69 % en moyenne

(Figure 2.A). Cette chute est plus importante que la perte de rendement du pois due aux adventices dans les cultures en pur (50 % en moyenne, Figure 2.C). Puisque les adventices sont souvent bien plus abondantes en pois en pur que le blé ne l'est dans l'association, ceci indique que le blé est plus compétitif que les adventices. Ceci explique pourquoi associer le pois avec du blé réduit la perte de rendement du pois due aux adventices jusqu'à 30 % comparé au pois en pur pour les variétés les moins tolérantes aux adventices comme Enduro (Figure 2.C), et le salissement du champ par les adventices jusqu'à 14 % pour les variétés les moins suppressives comme 886-1 (Figure 2.D).

4.2 Les rendements de pois en association et en pur sont fortement corrélés

Le comportement des variétés de pois en association est bien corrélé à celui en culture en pur, surtout pour le rendement en présence d'adventices (R^2 élevé pour la régression linéaire de la Figure 2.B). Certaines variétés se détachent des régressions linéaires, indiquant un bénéfice ou un coût plus important que la moyenne. La variété Virtual4 souffre par exemple moins de la présence du blé que la moyenne des variétés, tandis qu'Enduro est plus affectée (Figure 2.A).

4.3 La tolérance et la suppression des adventices ne vont pas de paire

Une tolérance élevée aux adventices n'est pas toujours accompagnée d'une forte suppression des adventices (c'est-à-dire, d'une faible infestation des champs). Par exemple, la 2^{ème} variété de pois la plus tolérante aux adventices en culture pure et en association, 886-1 (Figure 2.C), est la moins suppressive en pois pur et l'avant-dernière en association (Figure 2.D). Inversement, la 2^{ème} variété la plus suppressive, China, figure parmi les variétés les moins tolérantes aux adventices (Figure 2.C). En bref, les variétés de pois ont réagi différemment au blé dans les associations et aux adventices en pois pur.

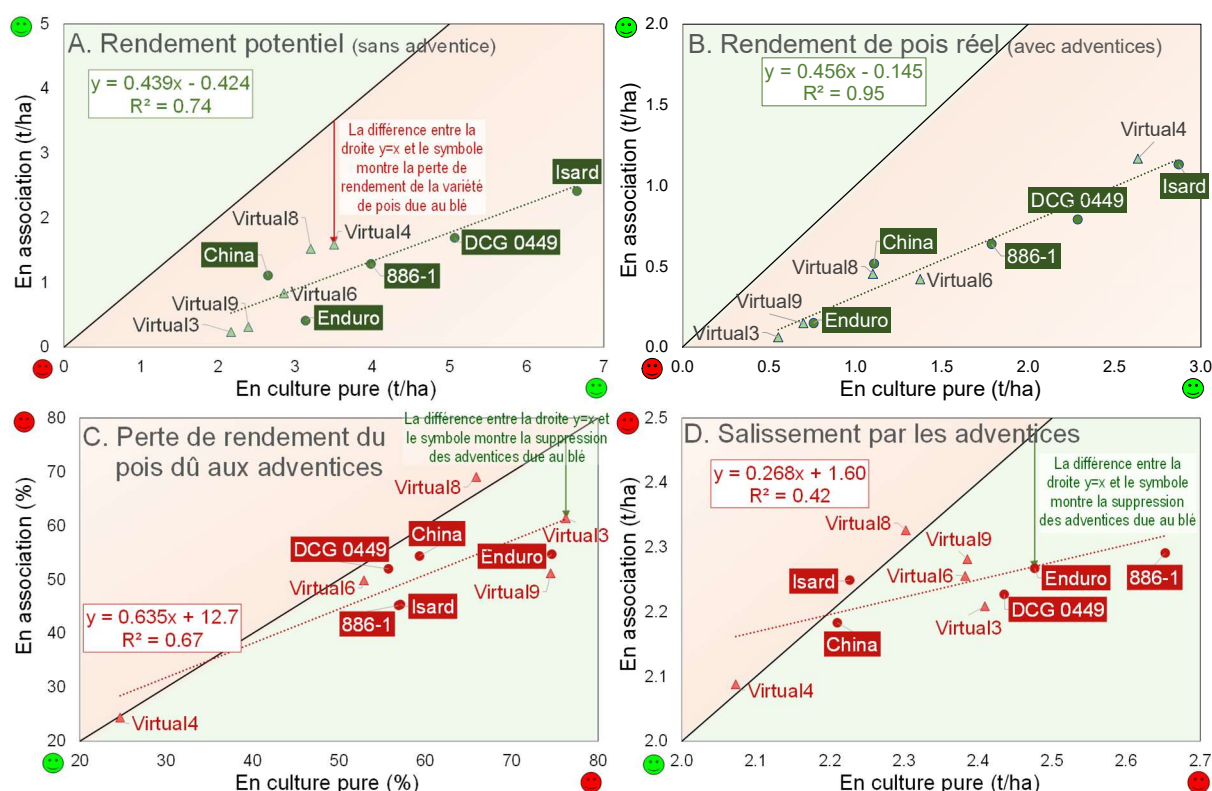


Figure 2 : Effet de l'association pois-blé sur le rendement potentiel (A) et réel (B) du pois, sa perte de rendement due aux adventices (C) et le salissement du champ par la biomasse adventice (D), en fonction des variétés de pois existantes et virtuelles. Moyennes des associations pois-blé (ou pois en pur) de 3 600 systèmes de culture x 5 répétitions météo simulés avec FLORSys sur 12 ans (ligne noire continue : $y=x$; lignes pointillées : régressions linéaires ajustées aux points ; zones vertes : l'association est meilleure que la culture en pure, et vice-versa pour les zones en rouge) (tiré de Colbach et al. in revision)



Ici, les idéotypes correspondent à la meilleure branche d'arbres construits avec différentes variables de réponse (rendement réel ou potentiel, perte de rendement due adventices, infestation du champ), différents prédictors (paramètres des variétés de pois seuls, ou aussi ceux du blé) et appliqués à toutes les associations ou aux seules associations additives, substitutives ou incomplètes. Les paramètres les plus influents (utilisés en premier dans les arbres et expliquant au moins 1 % de la variabilité sur l'ensemble des arbres) ont été retenus pour construire des tableaux synthétiques, comparant les idéotypes aux variétés de pois existants.

Tableau 1 : Combinaisons optimales de paramètres variétaux de pois pour maximiser le rendement de pois associé au blé, en l'absence (idéotype iP) ou présence d'adventices (iR), ainsi que la tolérance aux adventices (iT). Les règles en vert améliorent le rendement ou la tolérance comparé à certaines variétés de pois existantes (en gras, la valeur de paramètre est différente de 90% de la gamme de valeurs existantes), celles en rouge montrent des compromis (i.e., des valeurs de paramètres réduisant potentiellement la performance mais corrélés à des caractéristiques bénéfiques ou n'ayant pas d'effet dans les systèmes testés), celles en blanc montrent des règles respectées par les variétés actuelles (basé sur Colbach et al. in revision)

Combinaisons de caractéristiques des idéotypes de pois					Idéotypes comparés aux variétés existantes		
					Rendement potentiel (iP)	Rendement réel (iR)	Tolérance aux adventices (iT)
[1]	Dormance des semences						Plus dormant
[2]	Démarrage de la germination						Plus tôt
[3]	Vitesse de croissance racinaire pré-levée (tolérance à la sécheresse)					Plus lente	
[4]	Mortalité pré-levée due à la profondeur des semences						Plus faible
[5]	Mortalité pré-levée due à la compaction du sol						Plus forte
[6]	Vitesse de croissance post-levée (taux de croissance relatif)					Plus rapide	
[7]	Variabilité inter-plante de la surface foliaire à la levée					Similaire	
[8]	Hauteur maximale des plantes					Plus courte	Plus courte
[9]	Homogénéité de la hauteur des plantes			reproduction	Plus homogène		
[10]	Homogénéité de la largeur des plantes			végétatif	Plus homogène		
[11]	Largeur des plantes par unité de biomasse aérienne			végétatif	Plus étroite		
[12]	(Plant Width Biomass Ratio)			reproduction		Similaire	
[13]	% biomasse aérienne allouée aux feuilles (Leaf			levée		Similaire	Plus feuillu
[14]	Biomass Ratio)			reproduction	Plus feuillu	Similaire	
[15]	Position de la surface foliaire le long de la plante			levée		Plus basse	
[16]				végétatif		Plus basse	
[17]	Réponse à l'ombrage	Hauteur	de plante par unité de biomasse	levée	Plus courte	Plus courte	
[18]		Largeur	aérienne	reproduction		Plus large	
[19]		% biomasse aérienne allouée aux feuilles (Leaf Biomass Ratio)	végétatif		Plus feuillu		
[20]			reproduction		Plus feuillu	Plus feuillu	
[21]		Surface foliaire par unité de biomasse foliaire (Specific Leaf Area)	levée			Plus petite	Plus petite
[22]			reproduction		Plus petite		Plus grande
[23]		Position de la surface foliaire le long de la plante	végétatif		Plus haute	Plus haute	
[24]			reproduction			Similaire	
[25]	Largeur maximale du système racinaire				Plus étroite		Plus large
[26]	Position de la biomasse racinaire en fonction de la profondeur				Plus superficielle	Plus superficielle	
[27]	Croissance racinaire en sol compacté				Meilleure	Meilleure	
[28]	Tolérance au gel			reproduction			Plus tolérant
[29]	Photosynthèse en conditions chaudes				Plus faible	Plus faible	
[30]	Variétés de pois répondant à ces règles				Isard	Isard Virtual4	Virtual4

5.2 L'idéotype de pois passe-partout pour produire en l'absence d'adventices

Le Tableau 1 décrit des idéotypes de pois généralistes, c'est-à-dire les combinaisons de valeurs de paramètres variétaux de pois qui maximisent la performance du pois associé au blé, en moyenne sur toutes les situations simulées, sans tenir compte de la variété de blé associée ou du dispositif d'associatif. L'idéotype iP (P pour potentiel) vise à maximiser le rendement potentiel de pois (en l'absence d'adventices). Sa caractéristique dominante (la première règle de subdivision dans la Figure 3) est



l'allocation d'une plus forte proportion de biomasse aux feuilles pendant la reproduction (ligne [14] dans le Tableau 1), comparées aux 7 variétés de pois existantes dans FLORSYS. Les autres caractéristiques bénéfiques sont une hauteur [9] et largeur de plante [10] plus homogènes que dans les variétés existantes, une plus grande proportion de biomasse allouée aux feuilles [19][20] et une remontée de la surface foliaire vers le haut des plantes en cas d'ombrage [23]. Le système racinaire de cet idéotype est plus étroit [25] (laissant plus biomasse aux compartiments aériens et la compétition pour la lumière) et superficiel [26] (laissant moins d'eau pour la germination et levée du blé associé).

Ces caractéristiques bénéfiques viennent avec un coût, c'est-à-dire elles peuvent être corrélées à des caractéristiques potentiellement néfastes mais qui n'ont pas d'effet dans les systèmes de culture testés ou dont l'effet néfaste est négligeable face aux effets bénéfiques. C'est par exemple le cas de la photosynthèse plus réduite de l'idéotype à des températures chaudes [29]. Au final, une seule des 12 variétés de pois répond à ces règles contraignant les valeurs de paramètre, la variété Isard [30].

5.3 Des idéotypes différents pour le rendement et la tolérance aux adventices

Lorsque des adventices sont ajoutées aux simulations, l'idéotype de pois le plus performant iR (R pour réel) n'est pas tout à fait le même (Tableau 1) que le précédent iP maximisant le potentiel. La principale différence entre les deux idéotypes se situe immédiatement après la levée. En présence d'adventices, le pois doit avoir une croissance plus rapide que la plupart des variétés existantes [6], allouer une proportion de biomasse aux feuilles similaire à celle des variétés existantes [13], et répartir sa surface foliaire de manière plus homogène sur la hauteur de la plante [15]. Par ailleurs, les plantes non ombragées n'ont pas besoin d'être extrêmement hautes [8] ou extrêmement larges [12], sauf que les plantes reproductrices doivent allouer une proportion de biomasse aux feuilles similaire à celle des variétés existantes [14]. En termes de réponse à l'ombrage, les deux idéotypes sont assez similaires, sauf que les plantes iR deviennent plus larges par unité de biomasse que les variétés existantes [18], échappant ainsi à l'ombre latéralement. La photosynthèse de iR est aussi moins limitée en conditions chaudes [29].

Les caractéristiques de iR ont produit un potentiel de rendement similaire mais avec un meilleur rendement réel de pois que iP (Tableau 2). En effet, les règles variétales pour réduire les adventices sont différentes de celles qui déterminent le potentiel de rendement. Ceci devient évident en examinant l'idéotype iT (T pour tolérance aux adventices) qui minimise la perte de rendement du pois due aux adventices (Tableau 1). Cet idéotype n'a pas une seule caractéristique en commun avec iP (qui maximise le potentiel), et certaines des règles de iT contredisent les règles de iP. Par exemple, en cas d'ombrage, les feuilles de iT sont plus fines et plus grandes pendant la reproduction [22] (interceptant plus de lumière et ombrant plus les adventices). Cette adaptation n'est pas encore nécessaire après la levée [21], lorsque l'ombrage est rare.

Tableau 2 : Performance des idéotypes de pois sélectionné pour maximiser le rendement de pois (tous sauf iT) ou la tolérance aux adventices (iT) en association avec le blé. Les idéotypes de pois ont été identifiés à l'aide d'arbres de classification et régression (CART). Les performances sont les valeurs moyennes sur les associations dont les variétés de pois (toutes les lignes) et de blé (4 dernières lignes) répondent aux règles des idéotypes de pois et de blé, respectivement (basé sur Colbach et al. in revision)

Idéotype de pois	Idéotype sélectionné pour			Rendement					Infestation du champ (t/ha)
	Adventices	Variété de blé	Dispositif d'association	Pois (t/ha)		Blé (t/ha)		Association (kJ/ha)	
				Réel	Potentiel	Réel	Potentiel		
iP	non [§]	Toutes [§]	Tous ^{&}	1.1	2.4	1.7	4.0	85	2.2
iT	oui	Toutes	Tous	1.2	1.6	1.0	2.2	101	2.1
iR	oui	Toutes	Tous	1.4	2.4	1.6	3.5	101	2.3
iR*	oui	b1	Tous	4.2	5.5	0.6	0.6	196	1.1
	oui	b2	Tous	2.8	3.5	1.8	2.9	158	1.9
iA*	oui	bA	Additif	4.9	5.7	1.3	1.3	235	0.5
iS*	oui	bS	Substitutif	2.9	3.0	0.6	0.9	181	0.9

[§] Arbres réalisés sur les données issues des simulations sans (non) ou avec adventices (oui).

[§] Arbres réalisés avec les paramètres variétaux de pois uniquement (toutes) ou incluant aussi ceux du blé (les autres)

[&] Arbres réalisés sur tous les dispositifs d'association, ou seulement les dispositifs additifs ou substitutifs



Mais les principaux avantages de la iT sont sa germination précoce [2] et la faible perte pré-levée [4], sauf dans un sol compacté [5]. Ce dernier point n'est pas un problème car les cultures sont généralement semées dans des lits de semences non compactés. La vitesse de germination [2] a un prix, avec une dormance plus importante [1]. En d'autres termes, la précocité l'emporte sur la densité finale. Ces règles ont permis de réduire l'infestation des champs et la différence entre rendements réels et potentiels comparées aux deux autres idéotypes (iT vs iP et iR dans Tableau 2). Cependant, la tolérance aux adventices et la capacité à les supprimer ont un prix : le rendement potentiel de iT est bien plus faible, résultant au final dans un rendement réel plus faible que pour iR (maximisant le rendement réel), malgré sa meilleure tolérance aux adventices et une meilleure suppression des adventices (infestation plus faible).

Parmi les variétés de pois testées, deux correspondaient aux règles de iR pour le rendement maximum, Isard et Virtual4 (Tableau 1). Virtual4 respecte aussi les règles de iT pour la tolérance aux adventices, C'est d'ailleurs la variété avec la plus faible perte de rendement due aux adventices dans la **Figure 2.C**. Comme Isard correspond à la fois aux règles iP (maximisant le potentiel) et iR, cela signifie que différentes caractéristiques de la variété étaient pertinentes, en fonction de l'environnement, c'est-à-dire la présence de blé uniquement (dans iP) ou à la fois de blé et d'adventices (iR).

5.4 Choisir une variété de blé adaptée améliore la performance du pois

La performance du pois associé au blé est meilleure si la variété de blé est adaptée, c'est-à-dire si les arbres de régression et de classification analysent le rendement de pois en fonction des paramètres variétaux de pois et de blé. Les rendements de pois potentiel et réel sont alors multipliés par plus de 2 et 3, respectivement, et l'infestation du champ divisée par 2 pour l'idéotype de pois iR* (R pour rendement réel, et * pour adaptation au blé) associé à l'idéotype de blé b1 (Tableau 2). En revanche, les rendements de blé réel et potentiel sont divisés approximativement par 5 et 3, respectivement. Associer le même idéotype de pois iR* avec un autre idéotype de blé peut tout changer, comme le montre l'association avec le blé b2 : les rendements de blé sont réduits d'un tiers comparés à l'association avec b1, ceux de blé multipliés par 3–4 et l'infestation du champ par presque 2. L'idéotype de pois iR* est en fait l'exact opposé de l'idéotype iR (maximisant le rendement réel toutes variétés de blé confondues), montrant au passage que ce ne sont pas tellement des caractéristiques bénéfiques individuelles qui font qu'une variété est performante, mais la combinaison de plusieurs caractéristiques qui diffèrent en fonction de la situation.

5.5 Adapter la variété de pois au dispositif d'association

Selon le dispositif d'association, le meilleur idéotype n'est pas le même. L'idéotype de pois iA* choisi pour les dispositifs additifs et adapté au blé associé (Tableau 3) a toutes les caractéristiques de l'idéotype généraliste iP maximisant le rendement potentiel, avec en plus des exigences sur la germination-levée et l'implantation. Ces deux phases doivent être plus rapides et plus homogènes que pour la plupart des variétés de pois réelles utilisées ici, et sont indispensables pour que le pois occupe le terrain avant les adventices. Pour une meilleure performance, iA* doit être associé avec l'idéotype de blé bA, qui a une bonne et rapide germination-levée pour compléter l'occupation du terrain. Mais contrairement au pois iA*, le blé bA est petit, avec des feuilles vers le bas de la plante, et une forte allocation de biomasse aux racines. Cette dernière caractéristique réduit la capacité de compétition pour la lumière du blé (en en laissant plus au pois) et réduit l'eau disponible pour la germination-levée des adventices. Cette combinaison se traduit par le meilleur rendement de pois (et de l'interculture) et la meilleure suppression des adventices de toutes les situations analysées, au coût d'un des pires rendements de blé (Tableau 2).

L'idéotype de pois pour les dispositifs substitutifs iS* partage plusieurs caractéristiques avec l'idéotype iA* des dispositifs additifs, notamment les plantes larges, homogènes et feuillues (Tableau 3). De plus, iS* est grand, mais avec une germination-levée et implantation plus lente. Pour être efficace, iS* doit être associée avec un blé (bS) également plus grand et dont la germination est plus rapide pour compenser l'occupation plus lente du terrain par le pois face aux adventices. Bien que l'infestation par les adventices



soit plutôt bien contrôlée par la combinaison iS*–bS, les rendements de pois et de blé sont bien plus faibles que pour la combinaison iA*–bA (Tableau 2).

Tableau 3 : Caractéristiques majeures des combinaisons de paramètres variétaux de pois et de blé pour maximiser le rendement de pois réel (en présence d'adventices) dans une association avec le blé en fonction du dispositif d'association. Les cellules vertes et rouge montrent des caractéristiques variétales bénéfiques pour l'espèce. Pour le pois, seules les caractéristiques bénéfiques au pois sont montrées, en gras celles qui le distingue le plus des variétés existantes (basé sur Colbach et al. in revision)

Combinaisons de caractéristiques des idéotypes		Idéotypes comparés aux variétés existantes			
		Additif		Substitutif	
		Pois iA*	Blé bA	Pois iS*	Blé bS
[1]	Germination, levée,	Meilleure et plus rapide	Meilleure et plus rapide	Meilleure	Plus rapide
[2]	Implantation	Plus rapide et plus homogène		Plus homogène	
[3]	Plantes	Plus larges et plus homogènes	Plus petites et plus larges	Plus grandes, plus larges et plus homogènes	Plus grandes
[4]	Feuilles	Plus feuillu, vers le haut	Vers le bas	Plus feuillu	
[5]	Réponse à l'ombrage	Plus larges et plus feuillues		Plus grandes	
[6]	Système racinaire	Superficiel	Important		
[7]	Exigences thermiques		Tolérante au gel	Bonne photosynthèse en cas de chaleur	
[8]	Variétés répondant à ces règles	Isard	Virtual 5 6	DCG0449	Virtual 3 5 7

6. Le rôle de la gestion des intercultures

6.1 La performance dépend de la densité de semis

La réduction des rendements en dispositif substitutif est due aussi la plus faible densité de semis que dans les dispositifs additifs. En effet, les simulations montrent que les meilleurs rendements de pois (en présence d'adventices) sont obtenus avec des densités de semis de pois et de blé de 64 % de la densité habituelle en pur. Ceci correspond à un dispositif additif de 130 %. Au-delà, les rendements de pois diminuent au profit des rendements de blé, plus compétitif.

6.2 Le rôle clé des dates de récoltes et de la précocité des variétés

La fouille de données a aussi permis d'identifier les techniques culturales les plus influentes (Tableau 4). La technique plus influente (VIP le plus élevé dans le Tableau 4) est la date de récolte, qui est en fait un proxy pour la précocité des variétés. La récolte tardive ne peut augmenter le rendement uniquement si elle est associée à des variétés tardives. Ceci pointe vers le rôle clé de la date de floraison qui dépend du temps thermique depuis la levée pour les variétés hr (alors la floraison des variétés Hr dépend de la longueur du jour). Cependant, une récolte tardive laisse aussi plus de temps aux adventices de croître et de se reproduire, et est donc néfaste pour le contrôle des adventices.

6.3 Un tableau de conseil pour raisonner et comprendre l'effet des techniques culturales

Le Tableau 4 synthétise les effets des techniques culturales, distinguant les performances du pois et du blé, mais aussi rendement des cultures et contrôle des adventices. La dernière colonne explique les cases de ces effets. Ce tableau pourra accompagner les agriculteurs et autres acteurs lors de la conception de stratégies de gestion des associations. Par exemple, augmenter le délai entre dernier travail du sol et semis de l'association réduit les rendements réels, la tolérance aux adventices et la suppression des adventices car les adventices ont plus de temps pour lever après ce dernier travail du sol qui a nettoyé le champ des adventices levées en interculture.



Tableau 4 : Les principales techniques de gestion des associations pois-blé qui influencent le rendement, la tolérance aux adventices et la suppression des adventices. Les techniques les plus influentes ont été sélectionnées sur la base du prédicteur d'importance variable relative (VIP) sommé sur tous les arbres de classification et de régression. Une probabilité $\geq 0,90$ en vert (respectivement en rouge) signifie qu'une augmentation (respectivement une diminution) de la valeur des techniques entraîne une augmentation de la valeur de la variable de réponse. Les cellules vides indiquent des techniques à effet non significatif ou instable ou un VIP cumulé $< 0,01$ (tiré de Colbach et al. in revision)

Technique de gestion de l'association	Unité	Rendement potentiel		Rendement réel ou tolérance		Suppression des adventices	Total VIP	Causes de l'effet (identifiées à l'aide de l'analyse de variables d'état décrivant les adventices, les cultures et le sol)
		Pois	Blé	Pois	Blé			
Travail du sol								
Travail du sol superficiel	opérations par an			+			0.02	Réduit le stock semencier en déclenchant des germinations adventices pendant l'interculture ("faux semis"), détruit les adventices avant le semis
Travail du sol après 1 ^{er} nov	opérations par an				+		0.03	Plus de destruction d'adventices et semis tardif (voir date de semis)
Temps du dernier travail du sol au semis	jour			-	-	-	0.23	Laisse plus de temps aux adventices pour réinfester le champ après que le dernier travail du sol ait nettoyé le champ
Broyage	opérations par an			+	+		0.04	Détruit les adventices pendant l'interculture
Semis								
Date de semis					+		0.07	Laisse plus de temps pour du faux semis, réduit le temps de croissance des adventices en culture
Proportion derangs de pois dans l'association	rangs / rangs		-				0.02	Les plantes de pois occupent plus de place dans le champ et laissent moins de place au blé
Largeur d'interrang	cm		-	-	-		0.15	Plus de compétition entre plantes cultivées dans un rang donné, plus de lumière perdue par la culture sur l'interrang
Espèces semées en rang séparé	oui (1) ou non (0)	+	-				0.03	Le pois souffre plus de la compétition interspécifique mais le blé souffre plus de la compétition intraspécifique
Densité de semis totale (vs cultures en pur)	grains ·m²/ grains·m²	+	+				0.03	Plus de plantes de pois et blé dans le champ qui interceptent plus de lumière et laissent moins de place et de ressources aux adventices
Densité de semis du pois	vs pois en pur grains ·m²/ grains ·m²	+	+			+	0.05	Plus de plantes et surface foliaire de pois pour produire de la biomasse de pois et ombrer les adventices (mais pas le blé)
Densité de semis du blé	vs blé en pur grains ·m²/ grains ·m²	-	+	+			0.07	Plus de plantes et surface foliaire de blé pour produire de la biomasse de pois et ombrer les adventices et le pois associé
Autres								
Herbicides à plusieurs modes d'entrée	traitements par an			+	+		0.01	Détruit les adventices (et plus efficacement que les herbicides qui n'entrent que via les feuilles ou les racines ou le méristème)
Herbicides Anti-monocot	traitements par an				+		0.01	Moins d'adventices monocot survivent et concourent avec la culture
Herbicides Anti-dicot	traitements par an				+		0.01	Moins d'adventices dicot survivent et concourent avec la culture
Surface désherbée mécaniquement	m² / m²					+	0.02	Détruit plus d'adventices
Date de récolte		+	+	+	+	-	0.76	Laisse plus de temps pour la production de biomasse cultivée MAIS aussi plus de temps pour la croissance et reproduction des adventices



7. Discussion

7.1 Une des rares études à analyser l'effet des variétés de pois associé au blé sur les adventices

Notre étude est une des très rares études analysant les variétés de pois en termes de compétitivité face aux adventices dans les associations. Bien que les associations soient de plus en plus étudiées, les études se concentrent essentiellement sur l'utilisation de l'azote par les associations influant des légumineuses (Hauggaard-Nielsen et al. 2009; Bedoussac et Justes 2010a) et/ou la performance économique et les impacts environnementaux (Pelzer et al. 2012). Les rares études qui analysent les variétés tentent de maximiser le rendement potentiel, que ce soit en expérimentation (Annicchiarico et al. 2021; Kammoun et al. 2021) ou avec des modèles (Barillot et al. 2014). Ces derniers utilisent des modèles structure-fonction qui décrivent les plantes à l'échelle de l'organe au dépend de l'effet des techniques culturales et de la dynamique de levée (Gaudio et al. 2019).

7.2 Des résultats cohérents avec les observations de terrain

Les principales conclusions de notre étude sur le contrôle des adventices rejoignent les rares résultats obtenus sur le terrain. Par exemple, la réduction du rendement de pois due à l'association est en moyenne de 69% dans nos simulations (52 %-89 % en fonction des variétés), proche des valeurs rapportées dans la littérature : de 50 % (Bedoussac et Justes 2010b; Kammoun et al. 2021) à 78 %-84 % (Annicchiarico et al. 2021). La plus forte compétitivité du blé comparé au pois est aussi connue (Corre-Hellou et al. 2011; Annicchiarico et al. 2021; Gu et al. 2021). D'autres études ont également observé une corrélation négative entre rendements de pois et de blé en association, ou une corrélation positive entre rendements de pois en association et en pur (Annicchiarico et al. 2021; Kammoun et al. 2021). Les études encore plus rares s'intéressant à la suppression des adventices en association pois-blé tirent des conclusions similaires aux nôtres, par exemple que les variétés à forte biomasse de feuilles sont plus suppressives et que l'ombrage (ou une forte interception de la lumière) est crucial (Poggio 2005; Gronle et al. 2015).

7.3 Et les ressources du sol ?

Cette étude de simulation s'est concentrée sur la lumière, qui est la ressource pour laquelle cultures et adventices concourent le plus dans les systèmes de grande culture tempérés (Colbach et al. 2023). Cette simplification est acceptable dans la mesure où la sur-production des associations est essentiellement attribuée à une utilisation plus efficace de la lumière (Bedoussac et Justes 2010a). Cependant, les associations céréales-légumineuses visent souvent à réduire la fertilisation azotée. La compétition pour l'eau deviendra probablement bien plus importante avec le changement climatique (Laurent et al. 2023). Et bien la contribution de l'allélopathie pour la gestion des adventices reste à démontrer (Mahé et al. 2022; Moreau et al. 2024), il est possible que des variétés de blé allélopathiques puissent impacter une légumineuse associée. Ce sont autant de questions que nous avons commencé à traiter dans des nouvelles études de simulation.

8. Conclusion

Cette étude a révélé que la gestion de l'association (ainsi que la rotation et la gestion des autres cultures) est primordiale pour la tolérance aux adventices et la suppression des adventices tandis que le choix de la variété de pois prime pour le potentiel de rendement. Les paramètres variétaux du pois et leurs combinaisons les plus influents pour la production de pois et la régulation biologique des adventices dans les associations pois-blé ont été identifiés. Ces paramètres inhérents aux variétés et indépendants de l'environnement sont des pistes pour les sélectionneurs et agriculteurs pour sélectionner et choisir des variétés de pois plus performantes et adaptées au type de systèmes de culture et à l'objectif de production. Cependant, il faut maintenant lier ces paramètres compliqués à des variables faciles à mesurer en routine sur le terrain pour rendre nos résultats applicables.



Ethique

Les auteurs déclarent que les expérimentations ont été réalisées en conformité avec les réglementations nationales applicables.

Déclaration sur la disponibilité des données et des modèles

Les données qui étayent les résultats évoqués dans cet article sont accessibles sur demande auprès de l'auteur de correspondance de l'article.

Déclaration relative à l'Intelligence artificielle générative et aux technologies assistées par l'Intelligence artificielle dans le processus de rédaction.

Les auteurs n'ont pas utilisé de technologies assistées par intelligence artificielle dans le processus de rédaction.

ORCID des auteurs

Nathalie Colbach (0000-0002-3791-037X), Judith Burstin (0000-0002-4125-3499), Delphine Moreau (0000-0003-2640-9931)

Contributions des auteurs

NC : conceptualisation, simulations, analyses de données, rédaction. DM et JB : conseils, rédaction.

Déclaration d'intérêt

Les auteurs déclarent ne pas travailler, ne pas conseiller, ne pas posséder de parts, ne pas recevoir pas de fonds d'une organisation qui pourrait tirer profit de cet article, et ne déclarent aucune autre affiliation que celles citées en début d'article.

Déclaration de soutien financier

Ce projet a été financé par INRAE, les projets français ANR PPR SPECIFICS (ANR-20-PCPA-0008, www6.inrae.fr/specifics/), ANR PPR MoBiDiv (ANR-20-PCA-0006, www6.inrae.fr/mobidiv/), COPRAA (www6.inrae.fr/projet-copraa/) avec le soutien financier de l'OFB dans le cadre de l'APR « Les approches globales pour limiter l'utilisation des produits phytopharmaceutiques : Coupler le préventif et le curatif au sein des filières, des agriculteurs jusqu'aux consommateurs » lancé dans le cadre du plan Écophyto II+ et co-piloté par les ministères de la transition écologique, de l'agriculture et de l'alimentation, des solidarités et de la santé et de l'enseignement supérieur, de la recherche et de l'innovation, et les projets européens Horizon 2020 Research and innovation programme ReMIX (N 727217) et Horizon Europe IntercropVALUES project (N°101081973).

Références bibliographiques :

Annicchiarico P., Nazzicari N., Notario T., et al. (2021). Pea Breeding for Intercropping With Cereals: Variation for Competitive Ability and Associated Traits, and Assessment of Phenotypic and Genomic Selection Strategies. *Frontiers in Plant Science*, 12.

Barillot R., Escobar-Gutiérrez A.J., Fournier C., et al. (2014). Assessing the effects of architectural variations on light partitioning within virtual wheat-pea mixtures. *Annals of botany*, 114 4, 725-737.

Bedoussac L., & Justes E. (2010a). Dynamic analysis of competition and complementarity for light and N use to understand the yield and the protein content of a durum wheat–winter pea intercrop. *Plant and Soil*, 330, 37-54.

Bedoussac L., & Justes E. (2010b). The efficiency of a durum wheat-winter pea intercrop to improve yield and wheat grain protein concentration depends on N availability during early growth. *Plant and Soil*, 330, 19-35.

Breiman L., Friedman J.H., Olshen R.A., & Stone C.J. (éd.) *Classification and regression trees*. 1984, 254 p.

Colbach N., Adeux G., Cordeau S., & Moreau D. (2023). Weed-induced yield loss through resource competition cannot be sidelined. *Trends in Plant Science*.

Colbach N., Burstin J., & Moreau D. (in revision). Which pea traits for agroecological weed management in pea-wheat intercrops. A simulation study. *Field Crops Research*.

Colbach N., Colas F., Cordeau S., et al. (2021). The FLORSYS crop-weed canopy model, a tool to investigate and promote agroecological weed management. *Field Crops Research*, 261, 108006.



- Colbach N., Cordeau S., Queyrel W., et al. (2019). Du champ virtuel au champ réel - ou comment utiliser un modèle de simulation pour diagnostiquer des stratégies de gestion durables des adventices? *Agronomie, Environnement et Sociétés*, 9, 111-128.
- Colbach N., Felten E., Gée C., et al. (2022). Tracking ideal varieties and cropping techniques for agroecological weed management: a simulation-based study on pea. *Frontiers in Plant Science*, 13, 809056 (809023 p).
- Colbach N., Flament M., Maillot T., et al. (2024). La complémentarité des outils d'accompagnement des acteurs pour la gestion des adventices économe en herbicides. *Innovations Agronomiques*.
- Colbach N., Petit S., Chauvel B., et al. (2020). Relations entre niveau d'usage d'herbicides, flore adventice et rendement : analyse critique des méthodes et synthèse des acquis. *Innovations Agronomiques*, 81, 1-17.
- Corre-Hellou G., Dibet A., Hauggaard-Nielsen H., et al. (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.
- Gaudio N., Escobar-Gutierrez A.J., Casadebaig P., et al. (2019). Modeling mixed annual crops: current knowledge and future research avenues. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 39, 20.
- Gronle A., Heß J., & Böhm H. (2015). Effect of intercropping normal-leafed or semi-leafless winter peas and triticale after shallow and deep ploughing on agronomic performance, grain quality and succeeding winter wheat yield. *Field Crops Research*, 180, 80-89.
- Gu C., Bastiaans L., Anten N.P.R., et al. (2021). Annual intercropping suppresses weeds: A meta-analysis *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 322, 107658.
- Hauggaard-Nielsen H., Gooding M., Ambus P., et al. (2009). Pea-barley intercropping for efficient symbiotic N₂-fixation, soil N acquisition and use of other nutrients in European organic cropping systems. *Field Crops Research*, 113, 64-71.
- Jacob C.E., Johnson E.N., Dyck M.F., & Willenborg C.J. (2017). Evaluating the competitive ability of semileafless field pea cultivars. *Weed Science*, 64, 137-145.
- Jeuffroy M.-H., Casadebaig P., Debaeke P., et al. (2014). Agronomic model uses to predict cultivar performance in various environments and cropping systems. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 34, 121-137.
- Kammoun B., Journet E.-P., Justes E., & Bedoussac L. (2021). Cultivar Grain Yield in Durum Wheat-Grain Legume Intercrops Could Be Estimated From Sole Crop Yields and Interspecific Interaction Index. *Frontiers in Plant Science*, 12.
- Kiær L.P., Weedon O.D., Bedoussac L., et al. (2022). Supply Chain Perspectives on Breeding for Legume-Cereal Intercrops. *Frontiers in Plant Science*, 13.
- Laurent L., Ullmann A., & Castel T. (2023). How abrupt changes in surface temperature impacts water cycle over France? The case study of winter bread wheat area. *Total Environment Research Themes*, 8, 100079.
- Lebreton P., Bedoussac L., Bonnet C., et al. (2024). Optimiser les traits et proportions d'espèces ainsi que les motifs de semis pour la gestion agroécologique des adventices dans les associations bispécifiques de légumineuses et de céréales. *Innovations Agronomiques*.
- Lemerle D., Smith A., Verbeek B., et al. (2006). Incremental crop tolerance to weeds: A measure for selecting competitive ability in Australian wheats. *EUPHYTICA*, 149, 85-95.
- Mahé I., Chauvel B., Colbach N., et al. (2022). Deciphering field-based evidences for crop allelopathy in weed regulation. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 42, 50.
- Martre P., Quilot-Turion B., Luquet D., et al. (éd.) *Model-assisted phenotyping and ideotype design*. 2015, 349-373 p.
- Moreau D., Mahé I., Chauvel B., et al. (2024). Le rôle de l'allélopathie dans la régulation des adventices : entre rêve et réalité. *Innovations Agronomiques*.
- Oerke E.-C. (2006). Crop losses to pests. *Journal of Agricultural Science*, 144, 31-43



- Pelzer E., Bazot M., Makowski D., et al. (2012). Pea–wheat intercrops in low-input conditions combine high economic performances and low environmental impacts. *European Journal of Agronomy*, 40, 39-53.
- Poggio S.L. (2005). Structure of weed communities occurring in monoculture and intercropping of field pea and barley. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 109, 48-58.
- Tardieu F. (2003). Virtual plants : modelling as a tool for the genomics of tolerance to water deficit. *Plant Science*, 8, 9-14.
- Verret V., Gardarin A., Pelzer E., et al. (2017). Can legume companion plants control weeds without decreasing crop yield? A meta-analysis. *Field Crops Research*, 204, 158-168.
- Weisberger D., Nichols V., & Liebman M. (2019). Does diversifying crop rotations suppress weeds? A meta-analysis. *PLOS ONE*, 14, e0219847.
- Worthington M., & Reberg-Horton C. (2013). Breeding Cereal Crops for Enhanced Weed Suppression: Optimizing Allelopathy and Competitive Ability. *Journal of Chemical Ecology*, 39, 213-231.
- Zerner M.C., Rebetzke G.J., & Gill G.S. (2016). Genotypic stability of weed competitive ability for bread wheat (*Triticum aestivum*) genotypes in multiple environments. *Crop and Pasture Science*, 67, 695-702.



Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY-NC-ND 4.0)

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue Innovations Agronomiques et son DOI, la date de publication.