



Motifs de semis, traits et proportions d'espèces pour la gestion agroécologique des adventices dans les associations légumineuse-céréale

Pierre Lebreton, Aurélie Baquet, Laurent Bedoussac, Catherine Bonnet, Etienne-Pascal Journet, Eric Justes, Nathalie Colbach

► To cite this version:

Pierre Lebreton, Aurélie Baquet, Laurent Bedoussac, Catherine Bonnet, Etienne-Pascal Journet, et al.. Motifs de semis, traits et proportions d'espèces pour la gestion agroécologique des adventices dans les associations légumineuse-céréale. Innovations Agronomiques, 2025, 101, pp.74-84. 10.17180/ciag-2025-vol101-art07 . hal-05031046

HAL Id: hal-05031046

<https://hal.inrae.fr/hal-05031046v1>

Submitted on 11 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



Motifs de semis, traits et proportions d'espèces pour la gestion agroécologique des adventices dans les associations légumineuse-céréale

Pierre LEBRETON¹, Aurélie BAQUET¹, Laurent BEDOUSSAC², Catherine BONNET^{3, 4},
Etienne-Pascal JOURNET³, Éric JUSTES^{3, 5}, Nathalie COLBACH¹

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

² AGIR, Univ Toulouse, ENSFEA, INRAE, Castanet-Tolosan, France

³ AGIR, Univ Toulouse, INRAE, Castanet-Tolosan, France

⁴ adresse actuelle : DYNAFOR, Univ Toulouse, INRAE, Castanet-Tolosan, France

⁵ adresse actuelle : CIRAD, Département Persyst, Montpellier, France

Correspondance : Nathalie.Colbach@inrae.fr

Résumé

L'objectif de cette étude était d'évaluer par simulation avec le modèle FLORSYS, paramétré et évalué préalablement, les effets, en l'absence de stress azoté ou hydrique, d'associations bispécifiques légumineuse-céréale sur la dynamique des adventices et la production des cultures. Sept proportions d'espèces, neuf motifs spatiaux de semis et quatre mélanges (triticale-féverole, blé-féverole, blé-pois, orge-pois) ont été comparés aux cultures pures. Les simulations montrent que (1) les associations orge-pois et triticale-féverole contrôlent le mieux les adventices, (2) le motif alternant un rang de céréale et un rang de légumineuse, d'une part, et les proportions d'espèces avec deux tiers de céréales, d'autre part, maximisent les rendements et minimisent les pertes dues aux adventices, (3) la biomasse adventice en association est supérieure ou égale à celle en céréale pure mais toujours inférieure à celle en légumineuse pure et, (4) l'association bénéficie surtout aux légumineuses grâce à la compétition exercée sur les adventices par la céréale associée.

Mots-clés : Association, adventice, modèle, perte de rendement, motifs de semis, densité de semis, agroécologie

Abstract: Optimizing species traits and proportions and sowing patterns for agroecological weed management in legume-cereal intercrops

The aim of this study was to evaluate by simulation with the previously parameterized and evaluated FLORSYS model, the effects of bispecific legume-cereal intercrops on weed dynamics and crop production, in the absence of nitrogen or water stress. 7 species proportions, 9 spatial sowing patterns and 4 species mixtures (triticale-faba bean, wheat-faba bean, wheat-pea, barley-pea) were compared to their corresponding pure crop controls. Simulations showed that (1) barley-pea and triticale-faba bean mixtures provide the best weed control, (2) sowing patterns alternating one cereal row with one legume row and species proportions with two-thirds cereals maximize yields and minimize yield losses due to weeds, (3) weed biomass in intercrops is greater than or equal to that in pure cereals and less than that in pure legumes, and (4) intercropping is mostly beneficial for legumes thanks to the weed suppression by the more competitive cereals.

Keywords: Intercrop, weed, model, yield loss, sowing pattern, sowing density, agroecology



1. Introduction

Pour des raisons environnementales et sanitaires, l'utilisation des herbicides, qui sont des solutions techniques très efficaces, faciles à utiliser et peu chères en comparaison de leur efficacité, doit être réduite. Pour cela, nous avons besoin de nouvelles stratégies de gestion des adventices combinant différentes techniques culturales à l'efficacité partielle. Parmi ces techniques, la diversification des cultures et, notamment, les associations d'espèces, apparaît comme une piste intéressante grâce à de nombreux avantages en termes de rendement (Kiær *et al.*, 2009; Bedoussac *et al.*, 2015; Raseduzzaman & Jensen, 2017), d'efficacité d'utilisation des ressources (Pelzer *et al.*, 2014; Xu *et al.*, 2020) et de contrôle des adventices (Verret *et al.*, 2017; Gu *et al.*, 2021).

L'objectif de notre étude était d'analyser l'effet des associations bispécifiques légumineuse-céréale (intégrant différentes proportions et motifs de semis) sur la dynamique des adventices et la production par rapport aux cultures pures respectives. Afin de pallier les limitations des expérimentations au champ, entre autres pour l'évaluation des pertes de rendement liées aux adventices sur le long terme (Colbach *et al.*, 2020), le modèle FLORSYS (Colbach *et al.*, 2019; Colbach *et al.*, 2021) a été utilisé. C'est actuellement le modèle le plus complet pour évaluer l'impact des adventices sur la production des cultures et la biodiversité. Il a été paramétré et évalué préalablement avec des travaux entrepris depuis deux décennies. À partir de deux jeux de données issus d'essais de systèmes de culture, nous avons cherché à identifier les combinaisons d'espèces ainsi que les proportions de semis et les motifs permettant d'obtenir, relativement aux cultures en pur, les meilleures performances en termes de productivité et de gestion des adventices.

2. Matériel et méthodes

2.1 Le plan de simulation

Cette étude a simulé deux plans expérimentaux (voir les détails dans Lebreton *et al.*, 2024). Le plan d'expérience « proportions d'espèces » a testé sept possibilités pour les associations orge (*Hordeum vulgare* L.)-pois (*Pisum sativum* L.) et blé tendre (*Triticum aestivum* L.)-féverole (*Vicia faba* L.) (Tableau 1. Cette dernière est semée en rangs alternés avec respectivement trois rangs de blé pour un rang de féverole, alors que dans la première association, les deux espèces sont mélangées sur le rang.

Tableau 1. Les proportions de densités de semis des légumineuses (L) et céréales (C) testées dans les associations du dispositif « proportions d'espèces » simulé avec FLORSYS. Les densités de semis des cultures en pur étaient 36, 90, 210 et 360 semences/m² pour la féverole, le pois, l'orge et le blé, respectivement.

Dispositif d'association	Densité de semis relative			Label
	Total	Céréale	Legumineuse	
Additif	133%	100%	33%	100C33L
	150%	100%	50%	100C50L
	150%	50%	100%	50C100L
	133%	33%	100%	33C100L
Substitutif	100%	33%	67%	33C67L
	100%	50%	50%	50C50L
	100%	67%	33%	67C33L

Le plan d'expérience « motifs de semis » a comparé huit motifs pour les associations triticales (*Triticosecale*)-féverole, blé-féverole et blé-pois, comparant différentes proportions de rangs de céréales et légumineuses (Figure 1). Dans ce plan d'expérience, la densité de semis de chaque espèce en association est égale à 50% de celle en culture pure si bien que la densité de chaque espèce sur le rang varie en fonction du motif de semis (plus le nombre de rang d'une culture augmente, plus sa densité sur le rang diminue). Dans les deux plans d'expérience, l'inter-rang reste le même quels que soient les proportions de semis et les motifs testés (15 cm entre les rangs).

Pour les deux plans d'expérience, les associations ont été comparées aux cultures pures correspondantes (témoins). Les associations et les témoins ont été insérés dans des rotations de quatre ans (plan « proportions d'espèces ») ou six ans (plan « motifs de semis »). Les systèmes de culture



résultants ont été simulés sur 30 ans et répétés avec 10 scénarios climatiques de Toulouse (sud-ouest de la France). Chaque scénario a été simulé, soit sans adventice pour estimer le rendement potentiel, soit avec une flore adventice à haute densité typique de la région. Le plan « proportions d'espèces » a été conduit selon le cahier des charges de l'agriculture biologique et le plan « motifs de semis » en conventionnel, avec une utilisation réduite d'herbicides. En effet, les deux plans étaient inspirés d'essais réalisés sur le terrain, et ces modes de conduite ont été gardés pour ne pas mettre en cause la cohérence générale des rotations et techniques culturales des systèmes testés.

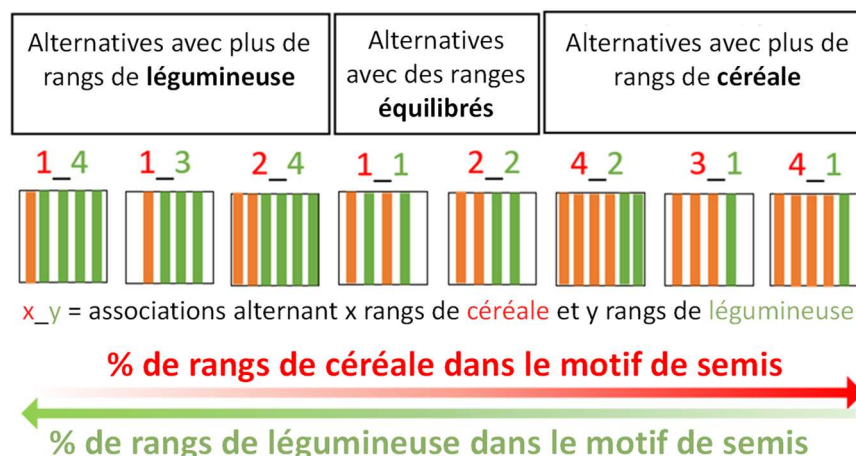


Figure 1. The motifs de semis testé pour les associations légumineuse-céréale dans les simulations avec FLORSYS, avec les rangs de légumineuse en vert et celles de céréale en orange. Les densités de semis et interrangs sont les mêmes dans tous les dispositifs. Les densités sur le rang d'une espèce diminuent donc lorsque la proportion de rangs augmente dans le mélange.

2.2 Le modèle FLORSYS

FLORSYS (Colbach *et al.*, 2019; Colbach *et al.*, 2021; Perthame *et al.*, 2024) est un champ virtuel sur lequel des systèmes de culture peuvent être testés avec une large gamme de variables d'état de la culture, des adventices et de l'environnement. Le modèle est actuellement paramétré pour 32 espèces d'adventices annuelles fréquentes et contrastées et 33 espèces cultivées. Les variables d'entrée de FLORSYS consistent en (1) une description du champ simulé, avec le climat journalier, la latitude et les caractéristiques du sol ; (2) toutes les cultures et opérations de gestion, avec les dates et les outils utilisés ; et (3) le stock semencier d'adventices dans le sol au début de la simulation. Ces variables influencent le cycle de vie annuel des adventices et des cultures (semences viables, dormantes, germées, en croissance pré-levée, plantes à différents stades, biomasse, etc.) et les processus impliqués (photosynthèse, respiration, croissance, réponse à l'ombre), avec un pas de temps journalier. Les processus du cycle de vie des adventices et cultures dépendent des dates, des options et des outils de gestion utilisés, en interaction avec les états des cultures, des adventices et du sol.

3. Résultats

3.1 Les associations contrôlent mieux les adventices

L'infestation du champ par la biomasse adventice des cultures pures (barres non hachurées dans la Figure 2) peut être utilisée pour classer les espèces en fonction de leur compétitivité face aux adventices. Triticale et orge sont les cultures les plus compétitrices (avec l'infestation adventice la plus faible), suivies du blé. La féverole et le pois sont les espèces les moins compétitrices, ce qui est bien connu par les praticiens. En d'autres termes, les céréales sont plus compétitrices que les légumineuses vis-à-vis des adventices.

La biomasse adventice est plus élevée ou similaire dans les associations que dans les céréales pures correspondantes, alors que les associations sont moins infestées que les légumineuses pures. L'association semble donc « protéger » les légumineuses grâce à la compétition exercée par la céréale associée sur les adventices. L'association triticale-féverole est celle qui a réduit le plus l'infestation comparée à la légumineuse (réduction de 15% contre seulement 8% pour les autres associations).



Les conclusions sont les mêmes en faisant l'analyse des pertes de rendement dues aux adventices (résultats non montrés). Les pertes des céréales dues aux adventices sont les mêmes ou un peu plus élevées en association qu'en céréale pure, alors que les pertes des légumineuses sont nettement plus faibles en association qu'en légumineuse pure.

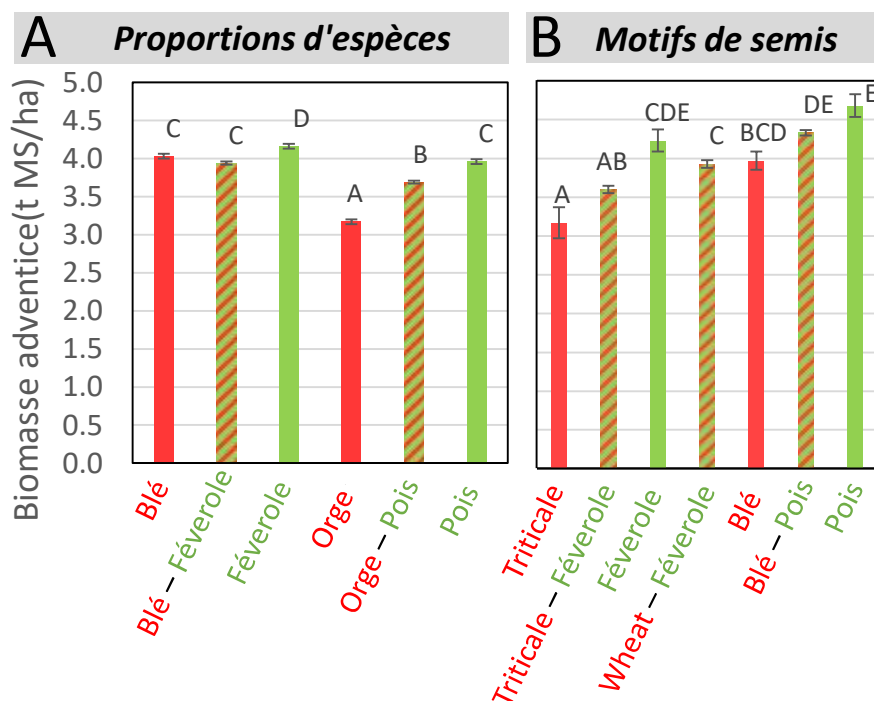


Figure 2. Biomasse des adventices dans les associations (hachurées) et dans les cultures pures correspondantes, avec les légumineuses en vert et les céréales en rouge, pour les plans « proportions d'espèces » (A) et « motifs de semis » (B). Pour un graphique donné, les barres ayant la même lettre ne sont pas significativement différentes à $p=0,05$ (tests de Tukey après analyse de la variance) (tiré de Lebreton *et al.*, 2024).

3.2 Effet des proportions de céréales et légumineuses dans l'association

En l'absence d'adventice, le rendement des céréales (barres rouges dans la Figure 3.A et B) augmente avec la proportion de plantes de céréales dans l'association, alors que le rendement des légumineuses diminue (barres vertes). L'effet inverse est observé pour l'augmentation de la proportion de plantes de légumineuses. Cependant, les rendements de céréales n'augmentent plus de manière significative au-delà de 67% de plantes de céréales dans l'association et le résultat est similaire pour les légumineuses.

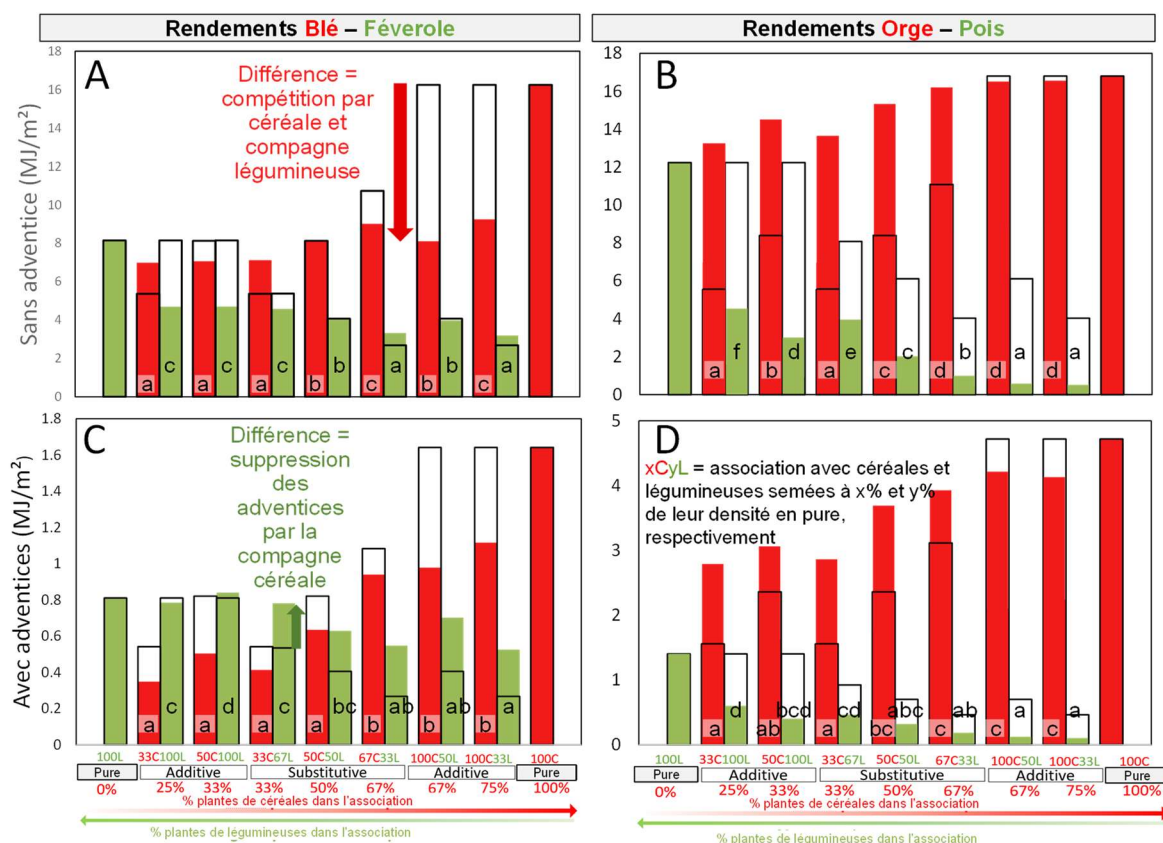


Figure 3. Effet des proportions d'espèces dans les associations céréales – légumineuses, en présence (A et B) et en l'absence (C et D) d'adventices, sur les rendements des céréales (barres rouges) et des légumineuses (barres vertes). Les barres vides montrent les rendements attendus tenant compte des densités de semis de l'espèce dans l'association, estimés en multipliant le rendement de l'espèce en pur par sa densité relative en association. Les barres pleines ayant des lettres identiques ne sont pas significativement différentes à $p=0,05$ (test de Tukey après analyse de la variance) (tiré de Lebreton *et al.*, 2024).

Dans l'association blé-féverole, les rendements de la céréale dans les associations à forte proportion de céréales sont plus faibles que ceux attendus tenant compte de la densité de semis et du rendement de la céréale pure (barres rouges plus petites que les barres noires vides, Figure 3.A) alors que les rendements de la légumineuse sont ceux attendus en théorie. Ces derniers sont estimés en multipliant le rendement de l'espèce en pur par sa densité relative en association. Les conclusions sont les mêmes pour les associations à forte proportion de légumineuses, à savoir que les rendements sont plus faibles qu'attendus pour la légumineuse et plus élevés qu'attendus pour la céréale. Pour l'association substitutive 50%-50%, les rendements correspondent à ceux attendus en théorie. Comme le blé-féverole est semé selon un motif 3 rangs-1 rang (indépendamment des densités de semis), les fortes densités de céréale ou de légumineuse augmentent tout d'abord la compétition intraspécifique avant de nuire à l'espèce compagne.

La situation est différente pour l'association orge-pois (Figure 3.B) : les rendements de la légumineuse sont toujours bien plus faibles que ceux attendus en fonction des densités de semis relatives alors que c'est le contraire pour la céréale. Il s'agit d'un cas de très forte compétition interspécifique de la céréale dominante sur la légumineuse peu compétitrice, favorisée par le mélange sur le rang des deux espèces. L'ajout des adventices dans les simulations n'y change rien : les rendements de la légumineuse restent plus faibles que ceux attendus pour les différentes densités de semis (Figure 3.D).

Ce n'est pas le cas pour l'association blé-féverole en présence d'adventices (Figure 3.C). Les rendements de la céréale y sont toujours plus faibles que ceux attendus pour les différentes densités de céréales alors



que ceux de la légumineuse sont similaires ou plus élevés que ceux attendus en fonction des densités de légumineuses, notamment pour les fortes densités de semis de la céréale. La légumineuse bénéficie ici de la suppression des adventices par la céréale compagne, très compétitrice. L'association substitutive 50%–50% est au final un bon compromis, avec les deuxièmes meilleurs rendements de céréale et de légumineuse, un rendement de céréale proche de celui attendu au regard de sa densité de semis et un rendement de légumineuse bien plus élevé que celui attendu.

3.3 Effets des motifs de l'association : favoriser la compétition envers les adventices aux dépens de celle envers la culture compagne

3.3.1 Préférez des motifs équilibrés

Dans l'association blé–féverole, en l'absence d'adventices, le rendement de la céréale augmente avec la proportion de rangs de céréale tout comme celui de la légumineuse avec la proportion de rangs de légumineuse (Figure 4.B). Le motif 3_1 est le même que celui utilisé pour cette association dans le plan « proportions d'espèces ». La conclusion des deux plans expérimentaux est similaire pour ce motif, à savoir des rendements de légumineuse et de céréale proches de ceux attendus au regard des densités de semis dans l'association. En revanche, le rendement de la légumineuse augmente bien plus dans les associations avec une plus forte proportion de rangs de légumineuse. En effet, comme les densités de semis à l'hectare restent inchangées, les densités de légumineuse sur le rang diminuent et la légumineuse souffre alors bien moins de la compétition intra et interspécifique, étant à la fois plus éloignée des autres plantes de légumineuses et des plantes de céréales.

La situation est différente en présence d'adventices où les rendements sont bien plus faibles que ceux attendus au regard des densités de semis, à la fois pour la céréale et la légumineuse dans les associations à forte proportion de rangs de légumineuse (1_4, 1_3, 2_4, Figure 4.E). Dans ce cas, la concentration des plantes de céréales sur un petit nombre de rangs amplifie la compétition intra-céréales au lieu de favoriser la compétition vis-à-vis des adventices comme pour les associations à proportions de rangs équitables (1_1, 2_2). *A contrario*, dans les associations dominées par les rangs de céréales (3_2, 3_1, 4_1), le bénéfice de la suppression des adventices par les céréales ne permet pas d'annuler la perte de rendement due à la compétition intra-légumineuse (puisque les plantes de légumineuses sont serrées sur peu de rangs) conduisant à des rendements de légumineuse plus faibles. Globalement, la féverole bénéficie quand même de l'association, alors que le blé est perdant, indiquant une compétition asymétrique.

3.3.2 Attention aux céréales trop compétitrices

La compétition dans l'association triticale–féverole (Figure 4.A et D) est également asymétrique, sauf que la céréale est toujours gagnante, à l'exception du motif avec un seul rang de céréale et en présence d'adventices (1_4 dans la Figure 4.D). La forte concentration des plantes de triticale sur peu de rangs exacerbe la compétition intra-céréale au dépend de la compétition sur les adventices. De nouveau, les motifs équilibrés (1_1 et 2_2) donnent les meilleurs rendements de céréale et de légumineuse. Le rendement de féverole reste cependant très faible du fait du fort pouvoir de compétition du triticale.

L'association blé–pois favorise moins la céréale alors que le blé est bien plus compétiteur que le pois (cf. § 3.1). En l'absence d'adventice, le blé est toujours gagnant, avec des rendements élevés et supérieurs à ceux attendus au regard de sa densité de semis dans l'association (Figure 4.C), mais c'est le cas aussi dans l'association avec la féverole (Figure 4.B). Le rendement de pois est toujours plus faible que celui attendu au regard de sa densité de semis (Figure 4.C), ne profitant pas autant, comme pour la féverole, des motifs dominés par les rangs de légumineuse (Figure 4.B). Par contre, en présence d'adventices, à la fois le blé et le pois sont gagnants dans les motifs équilibrés (1_1 et 2_2, Figure 4.F).

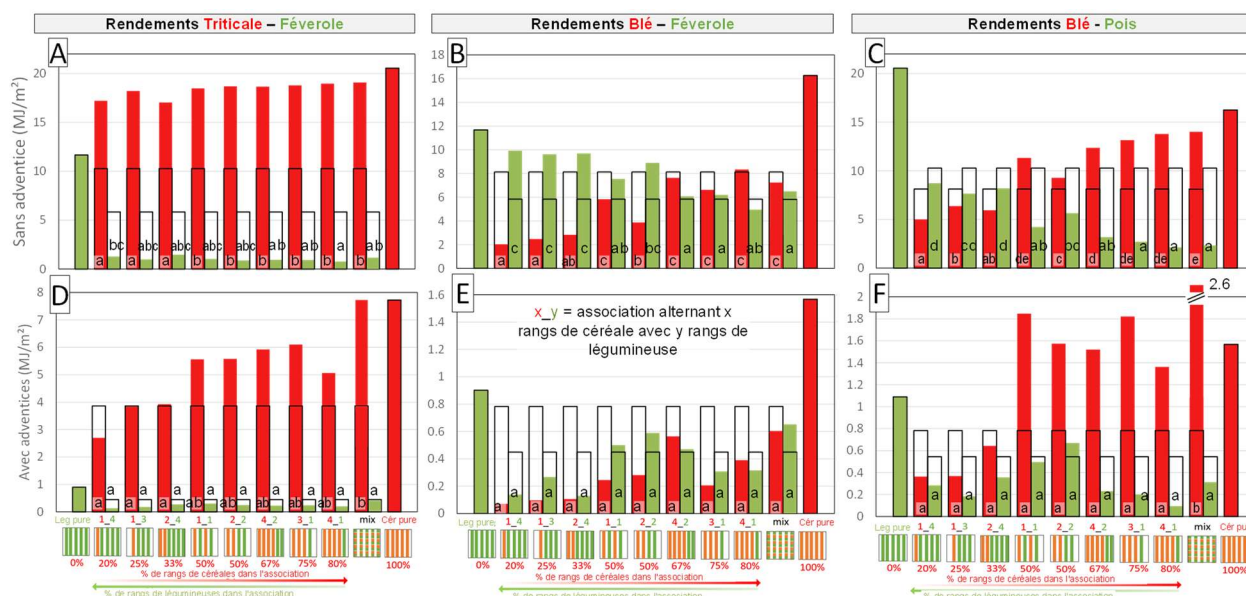


Figure 4. Effet des motifs de semis des associations céréales-légumineuses (mélange substitutif 50%–50 %) en présence (A-C) et en l'absence (D-F) d'adventices, sur les rendements des céréales (barres rouges) et des légumineuses (barres vertes). Les barres vides montrent les rendements attendus au regard des densités de semis et sont estimés en multipliant les rendements de la culture pure par sa densité de semis relative dans l'association. Les barres pleines ayant des lettres identiques ne sont pas significativement différentes à $p=0,05$ (test de Tukey après analyse de la variance) (tiré de Lebreton *et al.*, 2024).

3.3.3 Éviter les mélanges sur le rang pour les légumineuses peu compétitrices

Si une des cultures du mélange est bien plus compétitrice que l'autre, son rendement dans un mélange sur le rang (motif mix dans la Figure 4) est alors plus élevé qu'en rangs séparés, et vice-versa pour la culture la moins compétitrice. Ainsi, le rendement du blé associé au pois est plus élevé en mélange sur le rang que dans tous les semis en rangs séparés (Figure 4.C et F), surtout en présence d'adventices. En revanche, les rendements du pois sont les plus faibles dans les mélanges sur le rang, surtout comparés aux motifs en rangs séparés alternant un rang de céréale avec un rang de légumineuse (1_1). Il s'agit là du motif en rangs séparés distribuant les plantes de chaque espèce le plus uniformément dans la parcelle, tout comme le mélange sur le rang. Les mélanges sur le rang maximisent la compétition entre céréale et légumineuse, alors que les associations en rangs séparés favorisent plutôt la compétition des cultures contre les adventices et limitent la compétition entre cultures.

Les tendances sont similaires pour l'association triticale-féverole, avec des rendements de triticale similaires ou plus élevés en mélange sur le rang qu'en rangs séparés (Figure 4.A et D). En revanche, les rendements de la féverole, plus compétitrice que le pois, sont moins affectés par le mélange sur le rang que pour le pois. Enfin, dans la dernière association qui mélange la céréale la moins compétitrice (le blé) avec la légumineuse la plus compétitrice (la féverole), les performances des deux cultures sont similaires en mélange sur le rang qu'en rangs séparés (Figure 4.B et E).

4. Discussion

4.1 Un modèle est une représentation simplifiée de la réalité pour comprendre et explorer

Nous avons utilisé le modèle de simulation FLORSYS pour explorer une large gamme de proportions d'espèces et de motifs de semis d'associations céréale-légumineuse et ce, sur plusieurs décennies et avec différentes séries climatiques, ce qui est impossible sur le terrain. Grâce au plan expérimental virtuel



proposé, les simulations ont permis de mieux comprendre les interactions au sein du triptyque céréale–légumineuse–adventice et de distinguer et quantifier les effets liés aux espèces, aux associations (simulations avec cultures associées versus cultures pures toutes choses égales par ailleurs) et aux adventices (simulations avec adventices versus sans adventice toutes choses égales par ailleurs).

Pour autant, il est essentiel de garder à l'esprit que les modèles ne sont qu'une représentation simplifiée de la réalité dont les résultats dépendent de leur qualité de prédiction. Raison pour laquelle, nous avons évalué par le passé le modèle FLORSYS à l'aide d'observations indépendantes de terrain, provenant de différentes régions, sur plusieurs années (Colbach *et al.*, 2016; Pointurier *et al.*, 2021; Perthame *et al.*, 2024) et sur la base de parcelles suffisamment documentées. Cela a permis de distinguer les erreurs dues au modèle de celles liées aux données de terrain qui sont utilisées en entrées du modèle comme, par exemple, un stock semencier adventice initial inconnu ou des dates d'opérations culturales non renseignées.

Cette évaluation a montré que FLORSYS a une capacité de prédiction satisfaisante pour simuler des dynamiques d'adventices et pour comparer des systèmes de culture (ou des espèces) entre eux. Pour autant, les pertes de rendement dues aux adventices montrées ici peuvent paraître excessives. En effet, les simulations ont volontairement débuté avec une forte infestation en adventices pour mieux discriminer par la suite les scénarios testés. De même, contrairement à ce qu'auraient fait des agriculteurs, les pratiques culturales n'ont pas été adaptées au cours de la simulation, que ce soit en fonction de la flore adventice ou des conditions climatiques. En effet, l'objectif était d'évaluer l'effet des pratiques sur les adventices et non l'effet des adventices ou des conditions climatiques sur l'évolution des pratiques. Enfin, toutes les simulations ont été réalisées dans un contexte où l'azote et l'eau ne sont pas limitants après la levée des plantes, si bien que les résultats exposés traduisent uniquement la compétition entre plantes pour la lumière. Bien que ces conditions ne soient pas totalement comparables à des situations réelles, elles se rapprochent des contextes rencontrés dans nombre de systèmes de grande culture conduits en climat tempéré avec l'apport de fertilisants minéraux.

4.2 Des résultats cohérents avec les observations de terrain

Les principales conclusions de notre étude sur le contrôle des adventices rejoignent celles obtenues par différentes méta-analyses (Gu *et al.*, 2021) et revues de la littérature basées sur des données de terrain (Bedoussac *et al.*, 2015). Les simulations permettent d'extrapoler ces observations de terrain, notamment en testant les associations avec différents scénarios climatiques et sur une échelle pluri-annuelle, et de tester une plus grande diversité d'associations, notamment en termes de proportions et de motifs de semis. Les simulations, avec leurs sorties détaillées journalières, permettent aussi de décortiquer plus facilement les interactions culture–culture–adventices responsables des conclusions majeures du terrain et de nos simulations, à savoir : (1) un effet prépondérant du choix des espèces de l'association, (2) un effet faible des motifs de semis, (3) un effet limité des proportions de semis des espèces, (4) un meilleur contrôle des adventices en mélanges additifs, (5) un pouvoir concurrentiel plus fort des céréales que des légumineuses et, (6) un salissement des associations par les adventices proche de celui des céréales pures mais nettement moindre que celui des légumineuses pures. Les associations sont donc un excellent moyen de contrôler les adventices pour les légumineuses, notamment en agriculture biologique ou en situation de fort stock semencier adventice dans le sol.

4.3 Implications pour la gestion au champ

Notre étude ouvre des perspectives opérationnelles dans le choix des proportions de semis des espèces et de motifs de semis selon les objectifs visés et les compromis retenus entre (1) le rendement d'une des deux espèces du mélange (voir exemple du **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**), (2) le rendement total de l'association ou (3) la biomasse d'adventices et les pertes de rendement qui en découlent. Le **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** montre par exemple les règles permettant de maximiser le rendement de la légumineuse dans les rotations et pédoclimats testés. Des tableaux similaires pourraient



être construits pour maximiser la suppression des adventices, le rendement total de l'association ou seulement le rendement de céréale. Cependant, dans la mesure où les simulations actuelles considèrent que l'azote est non-limitant dans la parcelle, le meilleur moyen pour maximiser le rendement de la céréale est de semer uniquement de la céréale.

Tableau 2. Quelques règles pour optimiser un mélange céréale-légumineuse pour améliorer le rendement de la légumineuse en cas d'infestation par les adventices avec un sol et le climat de la région toulousaine.

Choix	Féverole	Pois	Pourquoi
Céréale associée	Blé		Orge et triticale sont trop compétitrices face à la légumineuse
Densité de légumineuse	$\geq 50\%$ de la densité en pur		Pour assurer le potentiel de rendement de la légumineuse
Densité de céréale	$\sim 50\%$ de la densité en pur		Si $< 50\%$, pas assez de suppression des adventices ; si $> 50\%$ trop de compétition pour la légumineuse
Rangs	Sans importance (rangs séparés si peu ou pas d'adventices)	Rangs séparés	Favoriser la compétition de la céréale face aux adventices (et non à la légumineuse)
Proportion de rangs de légumineuse	1 rang de légumineuse sur 2, ou 2 sur 4		Densité sur le rang identique à la densité en pur, potentiel de rendement de la légumineuse similaire à des proportions de rangs plus élevées et meilleure suppression des adventices par une répartition uniforme des céréales

Nous avons également analysé quelles caractéristiques (traits) et quelles combinaisons de traits des cultures donnaient le meilleur résultat en termes de rendement et de suppression des adventices (Lebreton *et al.*, 2024). Nous avons montré que le rendement d'une espèce dans l'association augmente avec sa surface foliaire spécifique (surface foliaire divisée par la biomasse foliaire) et sa différence de hauteur par rapport à la culture associée (Lebreton *et al.*, 2024). Ceci est cohérent avec des études de terrain sur les associations céréale-légumineuse en milieu tropical (MacLaren *et al.*, 2023). Nous avons aussi montré qu'une réponse à l'ombrage plus importante que pour la culture associée amplifie la complémentarité interspécifique et améliore encore plus le rendement. D'autres traits sont primordiaux en l'absolu, notamment une faible température de base pour germer et lever rapidement et devancer la levée et l'implantation des adventices.

5. Conclusion et perspectives

Ce travail à base de simulations a extrapolé des essais de terrain (en les répétant avec différents scénarios climatiques) et sur une échelle pluri-annuelle, de tester une plus grande diversité d'associations (en termes de proportions et de motifs de semis) et de décortiquer finement les interactions intra- et inter-espèces dans les mélanges céréale-légumineuse-adventices. Cette approche originale a permis de (1) confirmer l'intérêt des cultures associées, tout particulièrement pour les légumineuses, pour réduire le salissement par les adventices et, par conséquent, les pertes de rendement dues à ces dernières et (2) identifier des règles en termes d'espèces, proportions et des motifs de semis pour concevoir des mélanges céréale-légumineuse selon les objectifs visés. Il y a certes un compromis entre rendements de légumineuse et de céréale, mais quitte à avoir de la compétition interspécifique, autant avoir des graines de blé produites plutôt que des adventices dans son champ de légumineuses.

Par la suite, ce travail sera étendu à d'autres associations (espèces, variétés) et d'autres modes de gestion pour intégrer plus finement les pratiques des agriculteurs mais aussi prendre en compte des contextes où l'eau et l'azote sont limitants. Ces travaux pourront ainsi servir à la conception de systèmes de culture innovants en intégrant, entre autres, la résilience des systèmes conçus face aux changements climatiques et ce, dans une approche agroécologique de la gestion des adventices.

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.

ORCIDs des auteurs

Nathalie Colbach (0000-0002-3791-037X), Eric Justes (0000-0001-7390-7058)

Contributions des auteurs

Simulations : PL, données de terrain : CB, analyses statistiques : PL, conceptualisation, méthodologie : NC, LB, EJ, financement : NC, EJ, rédaction : tous.

Déclaration d'intérêt

Les auteurs déclarent ne pas ne travailler, ne 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 soutenu par l'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/) et COPRAA financé l'Office Français de la Biodiversité ainsi que les programmes de recherche et d'innovation Horizon 2020 Remix (N° 727217) et Horizon Europe IntercropVALUES (N° 101081973) de l'Union Européenne.

Références bibliographiques :

Bedoussac L., Journet E. P., Hauggaard-Nielsen H., Naudin C., Corre-Hellou G., Jensen E., Prieur L., Justes E., 2015. Ecological principles underlying the increase of productivity achieved by cereal-grain legume intercropping in organic farming. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 35, 911-935, 10.1007/s13593-014-0277-7.

Colbach N., Bertrand M., Busset H., Colas F., Dugué F., Farcy P., Fried G., Granger S., Meunier D., Munier-Jolain N. M., Noilhan C., Strbik F., Gardarin A., 2016. Uncertainty analysis and evaluation of a complex, multi-specific weed dynamics model with diverse and incomplete data sets. *Environmental Modelling & Software* 86, 184-203, <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.09.020>.

Colbach N., Cordeau S., Queyrel W., Maillot T., Villerd J., Moreau D., 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, <https://agronomie.asso.fr/aes-9-2-14>.

Colbach N., Petit S., Chauvel B., Deytieu V., Lechenet M., Munier-Jolain N. M., Cordeau S., 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, <https://doi.org/10.15454/bpst-th82>.

Colbach N., Colas F., Cordeau S., Maillot T., Queyrel W., Villerd J., Moreau D., 2021. The FLORSYS crop-weed canopy model, a tool to investigate and promote agroecological weed management. *Field Crops Research* 261, 108006, <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.108006>.

Gu C., Bastiaans L., Anten N. P. R., Makowski D., van der Werf W., 2021. Annual intercropping suppresses weeds: A meta-analysis *Agriculture, Ecosystems and Environment* 322, 107658, <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107658>.

Kiær L. P., Skovgaard I. M., Østergård H., 2009. Grain yield increase in cereal variety mixtures: A meta-analysis of field trials. *Field Crops Research* 114, 361-373, 10.1016/j.fcr.2009.09.006.

Lebreton P., Bedoussac L., Bonnet C., Journet E.-P., Justes E., Colbach N., 2024. Optimal species proportions, traits and sowing patterns for agroecological weed management in legume-cereal intercropping. *European Journal of Agronomy* 159, 127266 in press, <https://doi.org/10.1016/j.eja.2024.127266>.



MacLaren C., Waswa W., Aliyu K. T., Claessens L., Mead A., Schöb C., Vanlauwe B., Storkey J., 2023. Predicting intercrop competition, facilitation, and productivity from simple functional traits. *Field Crops Research* 297, 108926, <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2023.108926>.

Pelzer E., Hombert N., Jeuffroy M. H., Makowski D., 2014. Meta-analysis of the effect of nitrogen fertilization on annual cereal-legume intercrop production. *Agronomy Journal* 106, 1775-1786, 10.2134/agronj13.0590.

Perthame L., Petit S., Colbach N., 2024. La prédation des semences adventices par les carabes peut contribuer à réguler les adventices dans les systèmes de grande culture. *Innovations Agronomiques*

Pointurier O., Moreau D., Pagès, L., Caneill, J., Colbach, N., 2021. Individual-based 3D modelling of root systems in heterogeneous plant canopies at the multiannual scale. Case study with a weed dynamics model. *Ecological Modelling* 440, 109376, <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2020.109376>.

Raseduzzaman, M., Jensen, E. S., 2017. Does intercropping enhance yield stability in arable crop production ? A meta-analysis. *European Journal of Agronomy* 91, 25-33, 10.1016/j.eja.2017.09.009.

Verret, V., Gardarin, A., Pelzer E., Médiène S., Makowski D., Valantin-Morison M., 2017. Can legume companion plants control weeds without decreasing crop yield? A meta-analysis. *Field Crops Research* 204, 158-168, <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.01.010>.

Xu Z., Li C. J., Zhang C. C., Yu Y., van der Werf W., Zhang, F. S., 2020. Intercropping maize and soybean increases efficiency of land and fertilizer nitrogen use; A meta-analysis. *Field Crops Research* 246, 10.1016/j.fcr.2019.107661.



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.