



HAL
open science

ALLIANCE: Amélioration des performances écologiques et économiques par association de plantes de services légumineuses dans des systèmes de grandes cultures.

Muriel Valantin-Morison, Valentin Verret, Safia Médiène, Antoine Gardarin, Mathieu Lorin, Elise Pelzer, Florian Celette, C. Naudin

► To cite this version:

Muriel Valantin-Morison, Valentin Verret, Safia Médiène, Antoine Gardarin, Mathieu Lorin, et al.. ALLIANCE: Amélioration des performances écologiques et économiques par association de plantes de services légumineuses dans des systèmes de grandes cultures.. Innovations Agronomiques, 2019, 71, pp.349-365. 10.15454/BJQLLK . hal-02622054

HAL Id: hal-02622054

<https://hal.inrae.fr/hal-02622054>

Submitted on 26 May 2020

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 Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

ALLIANCE : Amélioration des performances écologiques et économiques par association de plantes de services Légumineuses dans des systèmes de grandes cultures

Valantin-Morison M.¹, Verret V.², Médiène S.¹, Gardarin A.¹, Lorin M.¹, Pelzer E.¹, Celette F.², Naudin C.⁴

1 UMR 211 Agronomie ; INRA-Agro Paris Tech ; Avenue Lucien Bretignière, F-78850 Thiverval-Grignon

2 AgroFle, 2 hameau de Chalmont, F-77930 Fleury-en-Bière

3-ISARA Lyon ; Université de Lyon - 23 rue Jean Baldassini, F-69364 Lyon Cedex 07

3 Jouffray Drillaud – Station de la Vannelière ; RD 347, 4 avenue de la CEE, F-86170 Cissé

4 Leva ESA d'Angers, 55 sur de Rabelais, F-49000 Angers

Correspondance: muriel.morison@inra.fr

Résumé

L'objectif de ce projet était de (1) **quantifier les services écosystémiques** rendus par les associations « cultures de rente – Plantes de services » pour le **colza d'hiver et le blé tendre d'hiver**, et leurs effets sur les cultures suivantes dans des systèmes de grandes cultures stricts (plus ou moins diversifiés) et de polycultures élevages, en agriculture conventionnelle et biologique (2) tester différentes conduites culturales et des outils pour accompagner cette innovation

Ce travail a démarré par une méta-analyse de résultats expérimentaux extraits de 34 articles scientifiques couvrant 17 pays, et a montré que les plantes compagnes associées à différentes cultures annuelles conduisent à une réduction de 56% de la biomasse d'adventices par rapport à une culture seule non-dés herbée, et 42% par rapport à une culture seule dés herbée. Puis des expérimentations en parcelles agricoles et en conditions semis contrôlées ont été mises en place. Concernant le colza, des plantes de services gélives, le plus souvent choisies dans la famille des légumineuses ont été semées en même temps que le colza pour concurrencer les adventices et perturber les insectes pendant l'automne (Lorin et al., 2015). La plante de services ne survivant pas à l'hiver, le colza termine son cycle sans concurrence et bénéficie d'azote restitué par les résidus de plantes. Les résultats de 79 essais menés en France entre 2009 et 2016 ont permis de valider cette technique et d'évaluer les intérêts multi-critères de plusieurs conduites. Les plantes légumineuses gélives associées au colza permettent à la fois de réduire la fertilisation de 30 kg N/ha sans perdre de rendement. En agriculture biologique, en comparaison à un semis après la récolte du blé, le semis sous couvert au printemps permet aux légumineuses de se développer plus rapidement une fois le blé récolté. Les effets sur le blé sont négligeables, alors que le contrôle des adventices est directement lié à la biomasse produite avant la fin de l'été et ne sera effectif qu'après la récolte du blé, pendant l'interculture.

Un outil, permettant d'aider au choix de l'espèce à associer en fonction d'objectifs agronomiques, a été conçu selon une démarche participative afin d'intégrer et partager les connaissances existantes sur les associations colza – plantes de services. Le modèle développé s'appuie sur une démarche fonctionnelle reliant les traits des espèces candidates, aux processus et aux services potentiels.

Mots-clés : grandes cultures, plantes de services, mélanges d'espèces, services écosystémiques, utilisation azote, compétition, facilitation, adventices, rendement

Abstract: ALLIANCE: Improved ecological and economic Performance by association of service plants in field cropping systems

The objective of this project was to (1) quantify the ecosystem services provided by the "cash crops - service plants" associations for winter rape and soft winter wheat, and their effects on the following crops in more or less diversified field crops and livestock systems, in conventional and organic agriculture (2) test different cultural practices and tools to accompany this innovation.

This work began with a meta-analysis of experimental results from 34 scientific articles from 17 countries, and showed that companion plants associated with different annual crops lead to a 56% reduction in weed biomass compared to a single unweeded crop, and 42% compared to a weeded crop. Then experiments in agricultural fields and controlled sowing conditions were set up. Concerning rapeseed, frost susceptible species, most often selected among legumes, were sown at the same time as rapeseed to compete with weeds and disturb insects during the fall (Lorin, 2015). As the companion plant does not survive the winter, the rapeseed ends its cycle without competition and benefits from nitrogen released by plant residues. The results of 79 trials conducted in France between 2009 and 2016 validated this technique and assessed the multi-criteria interests of several pipes. The legume plants associated with rapeseed make it possible to reduce fertilization by 30 kg N/ha without yield lost. In organic farming, compared to a post-harvest sowing of wheat, sowing in spring with wheat undercover, allows legumes to grow more quickly once the wheat is harvested. The effects on wheat growth are negligible, whereas weed control was directly related to the biomass produced before the end of summer and will only be effective after the wheat harvest, during intercrop cultivation.

A tool, which helps to choose the species to be associated according to agronomic objectives, has been designed using a participatory approach in order to integrate and share existing knowledge on the associations between rapeseed and service plants. The model developed is based on a functional approach that links the traits of candidate species to potential processes and services.

Keywords: arable crops, service plants, species mixtures, intercropping, ecosystem services, nitrogen use, competition, facilitation, weeds, yield

Introduction

Contexte

Les agricultures française et européenne sont à la croisée des chemins ; elles doivent allier productivité et qualité mais aussi respect de l'environnement et préservation des ressources et de la biodiversité fonctionnelle permettant d'assurer des services écosystémiques. Les objectifs assignés aux systèmes de culture se complexifient avec plusieurs défis à relever : (1) produire des biens alimentaires et non alimentaires (énergie, produits dérivés de la chimie verte) pour une population en croissance dans un contexte de changement climatique, (2) réduire le recours et la dépendance aux intrants chimiques (fertilisation, pesticides), et aux énergies non renouvelables (phosphore, pétrole) dans un contexte de changement climatique, (3) préserver les ressources naturelles et protéger notre environnement. Cela implique de repenser entièrement les systèmes de culture d'aujourd'hui : leurs objectifs, les pratiques qui en découlent, l'évaluation de leurs performances (Meynard et al., 2012), en mobilisant les services écosystémiques existant dans les agrosystèmes (Malézieux, 2012) mais aussi des pratiques agroécologiques telles que l'association végétale, le contrôle biologique des bioagresseurs et le recyclage des nutriments (Wezel et al., 2014). Face à la pression sociale et environnementale, les pouvoirs publics se sont engagés à faire évoluer les modes de production via des législations telles que les directives nitrates, les plans Ecophyto ou le projet agroécologique pour la France.

L'une des hypothèses couramment avancée en agro-écologie est qu'en augmentant la biodiversité végétale cultivée, par exemple via des peuplements plurispécifiques, les régulations et les interactions

biologiques pourront être remobilisées au service de systèmes de culture moins dépendants des intrants de synthèse, aux performances économiques et environnementales accrues. Les plantes de service sont des espèces mises en culture n'ayant pas un objectif direct de production mais dont on attend principalement des bénéfices pour la culture compagne et l'environnement (couverture et structuration du sol, piégeage des nitrates, etc). Leur utilisation en association avec une culture de vente, c'est-à-dire la coexistence des espèces pendant une période significative de leur cycle, est une pratique peu répandue dans les systèmes de culture actuels. Pourtant, l'insertion de plantes de services en association selon différentes modalités (mulch vivant, association simultanée ou en relai) permettrait de lever certains facteurs limitant le rendement (disponibilité de l'azote, compétition des adventices, dégâts d'insectes) conduisant à réduire le recours aux intrants et les pollutions qui leurs sont associées.

Dans ce projet, nous nous sommes intéressés spécifiquement aux couverts dans lesquels une culture de rente est associée, pendant tout ou une partie de son cycle, à des plantes de service (ou plantes compagnes) non récoltées. Les deux cultures commerciales étudiées dans le projet étaient :

- Le colza d'hiver, associé à des plantes de service gélives à l'automne, et qui sont amenées à disparaître pendant l'hiver.
- Le blé d'hiver, associé à des plantes de service semées à différents moments : (i) en anticipé, avant le semis du blé, (ii) en simultané, en même temps que le blé, ou (iii) en relais sous couvert de blé au printemps. Les effets de ces associations végétales ont été évalués en agriculture conventionnelle et en agriculture biologique.

La finalité de ce projet a été de raisonner l'introduction de plantes de service en fonction des objectifs attendus et des milieux dans lesquels les systèmes de culture sont implantés.

Objectifs généraux du projet

L'objectif de ce projet a été de **quantifier les services écosystémiques** rendus par les associations « cultures de rente – Plantes de services » pour le **colza d'hiver et le blé tendre d'hiver**, et leurs effets sur les cultures suivantes dans des systèmes de grandes cultures stricts (plus ou moins diversifiés) et de polyculture-élevage, en agriculture conventionnelle et biologique.

Les services attendus sont (1) la **régulation naturelle des bioagresseurs** au sens large (maladies, insectes, adventices), (2) la **réduction de l'utilisation de la ressource azotée minérale via l'utilisation de processus biologiques (fixation d'azote atmosphérique, matière organique, interactions entre plantes...)** et indirectement la réduction des coûts énergétiques et des émissions de gaz à effet de serre (GES) associés et (3) le **maintien de la production**.

Pour à la fois s'assurer de l'intérêt des plantes de service pour l'agriculture de demain et partager puis s'assurer de l'adoption de telles solutions, le projet s'est décomposé en trois volets scientifiques, décrits ci-dessous.

Les partenaires de ce projet étaient :

Chambre d'Agriculture Régionale de Nouvelle-Aquitaine, Chambre d'Agriculture Départementale de l'Aisne (02), de Charente (16), de Charente-Maritime (17), de l'Eure (27), du Maine-et-Loire (49), de l'Oise (60), de Seine-Maritime (76), de Seine-et-Marne (77), des Deux-Sèvres (79), de la Somme (80).

Ecole Supérieure d'Agriculture d'Angers, unité de Recherche « Légumineuses, Ecophysiologie Végétale, Agroécologie » (LEVA).

EPLEFPA de Vesoul.

In Vivo – Agrosolutions.

ISARA-Lyon, équipe « Agroécologie et Environnement » (AGE).

Jouffray-Drillaud.

Lycée Nature de La-Roche-sur-Yon.

1. Identifier, inventorier les intérêts et les limites des plantes de service en association

1.1 Objectifs et démarches

L'objectif général de cette action est de faire un état des lieux initial :

1. Des connaissances de la littérature scientifique sur (i) les effets des plantes de service associées au blé et au colza d'hiver d'une manière générale sur le fonctionnement des couverts cultivés, les services éco-systémiques rendus et (ii) les liens possibles entre les traits des espèces, les fonctions (captage des ressources, production de graines, etc.) et les services écosystémiques attendus.
2. Des expériences agronomiques passées réalisées en France et de l'expertise qui en découle sur les modes d'implantation, les échecs et les réussites, les services rendus (économie d'intrants, recyclage de l'azote pour les cultures suivantes, réduction d'attaques d'insectes...) ou les dis-services (pertes de rendement, compétition...).

Nous avons pour cela à la fois réalisé une revue scientifique, une méta-analyse et capitalisé des données passées.

1.2 Recueil et analyse de la littérature scientifique

1.2.1 Revue de la bibliographie scientifique

En parallèle des travaux de rédaction de thèse des étudiants doctorants financés par le projet Alliance, une revue bibliographique a été menée à l'UMR Agronomie, et en collaboration avec les autres partenaires scientifiques du projet (ESA, ISARA) pour explorer la diversité des associations ayant recours à des plantes de services légumineuses ou non-légumineuses, au delà des associations pour le colza et pour le blé qui font l'objet principal de ce projet. Des recherches ont été menées dans les bases de données bibliographiques (Web of Knowledge, CABI) et environ 300 articles ont été synthétisés dans un tableau, en fonction du type d'association (implantation de la culture dans un mulch vivant de plantes compagnes, semis simultané de la culture des plantes de services, implantation en relais de la plante de services dans la culture) et des services écosystémiques recherchés par les auteurs (maintien du rendement, régulation des adventices, perturbation des insectes, recyclage des nutriments, effet sur la culture suivante) (Tableau 2). Cette base permet d'ores et déjà aux chercheurs de s'inspirer de ce qui a déjà été fait pour tester de nouvelles associations pertinentes et faire évoluer les méthodes de production.

En plus, de cette méta-analyse, une première synthèse de ces connaissances a été réalisée à l'occasion d'un « Carrefour de l'Innovation Agronomique » en novembre 2014 (Valantin-Morison et al., 2014).

Une deuxième synthèse a été réalisée avec l'objectif de préciser les mécanismes par lesquels les plantes de service peuvent effectivement rendre des services à la culture commerciale ou à la suivante. Les 214 articles analysés pour ce travail de synthèse sont les études portant sur les systèmes de grandes cultures annuelles dans les régions plutôt tempérées. Il ressort de cette synthèse que les pratiques agricoles (choix des espèces, organisation spatiale et temporelle, fertilisation, travail du sol, etc.) sont déterminantes de la production des différents services de lutte contre les adventices et les insectes, ainsi que d'amélioration de la fertilité du sol (Figure 1). Ce travail décortique les interactions bénéfiques (facilitation et complémentarité) ou néfastes (compétition) entre la culture de rente, les plantes de services et leur milieu. Cette synthèse a permis de mieux comprendre comment piloter ces associations végétales tout en maximisant les services et minimisant les disservices. Elle fait l'objet d'un article en anglais à soumettre dans un journal à comité de lecture (soumission prévue à l'hiver 2019 dans *Agronomy for a Sustainable Development*).

1.2.2 Méta-analyse de l'effet des plantes de services sur les adventices et le rendement

Sur la base des analyses bibliographiques mentionnées ci-dessus, il a été jugé intéressant d'analyser de manière quantitative, sous la forme d'une méta-analyse, l'effet des plantes de service sur la régulation d'adventices ainsi que le maintien des rendements. Nous avons tenté de répondre à la question suivante : « **Est-ce que les légumineuses – plantes compagnes améliorent le contrôle des adventices sans impacter le rendement ?** ». En effet, le contrôle des adventices et la réduction de l'usage des herbicides font partie des raisons principales des agriculteurs pour l'insertion de plantes compagnes dans les systèmes de culture. Cependant, les plantes compagnes entrent en compétition avec les adventices pour la lumière, les nutriments et l'eau, mais aussi potentiellement, avec la culture de vente. Les espèces doivent donc être choisies et gérées de manière à concourir avec les adventices tout en limitant la compétition avec la culture et les pertes de rendement.

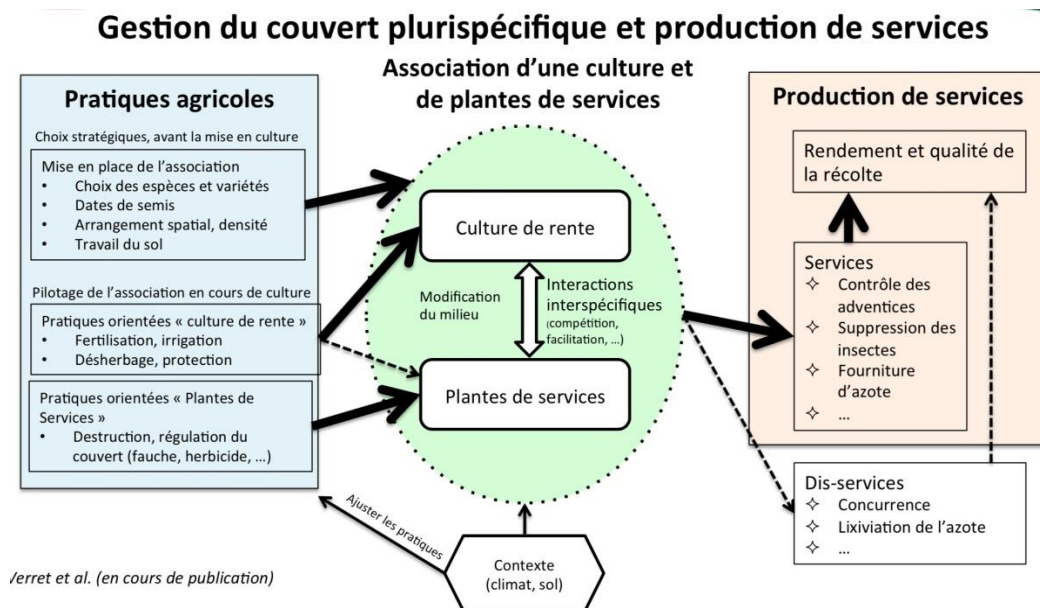


Figure 1 : Pilotage des associations d'une culture de rente à des plantes de service, par les pratiques agricoles, en vue d'en obtenir des services (review pour ASD en cours d'écriture).

Les adventices sont un facteur limitant la production des cultures par les effets de concurrence pour les ressources (lumière, eau, azote). L'hypothèse testée ici est que les plantes de service peuvent induire des effets de compétition qui pénalisent préférentiellement les adventices et non la culture de rente, de manière à réduire les pertes de rendement causées par les adventices. Le rendement de la culture pourrait être maintenu si la plante de service n'exploite pas les mêmes ressources que la culture, et pourrait même être augmenté si la plante de service provoque des facilitations pour la culture, c'est-à-dire des modifications du milieu dans un sens favorable pour la culture.

Cette méta-analyse (Verret et al., 2017a) compile 476 observations expérimentales issues de 34 articles scientifiques, et examine s'il est possible d'améliorer le contrôle des adventices sans impacter le rendement dans des systèmes associant une culture de vente annuelle et des plantes compagnes légumineuses à travers le monde. Brièvement, l'association avec une plante compagne a permis de réduire la biomasse d'adventices et de gagner du rendement par rapport à des cultures seules non-dés herbées ou dés herbées dans 52% et 34% des observations respectivement. Des biomasses d'adventices plus élevées et des pertes de rendement n'ont été observées que dans 13% et 27% des cas, respectivement par rapport à des cultures seules non-dés herbées ou dés herbées. En moyenne, les plantes compagnes n'ont pas eu d'effet significatif sur le rendement de la culture de vente, mais ont permis une réduction de 56% de la biomasse d'adventices par rapport à une culture seule non-

désherbée, et 42% par rapport à une culture seule désherbée. Les cultures de maïs, du fait de leur sensibilité à la pression des adventices (culture à large écartement, culture gourmande en eau et en azote), ont le plus bénéficié de l'association à des plantes compagnes, avec un gain de rendement moyen de 37% (Figure 2) par rapport à une culture non-désherbée. Les bénéfices de ces associations semblent plus importants dans les situations de comparaison à des témoins non-désherbés. Dans ces cas, les actions de désherbage, qui ont déjà une efficacité certaine, laissent peu de marge d'action à la plante associée pour participer à la lutte contre les adventices.

En conclusion, l'utilisation de plantes compagnes légumineuses permet globalement d'améliorer le contrôle des adventices sans réduire le rendement de la culture de vente, mais les conditions qui permettent d'aboutir à des situations doublement gagnantes doivent être approfondies pour encourager l'adoption de cette technique par les agriculteurs.

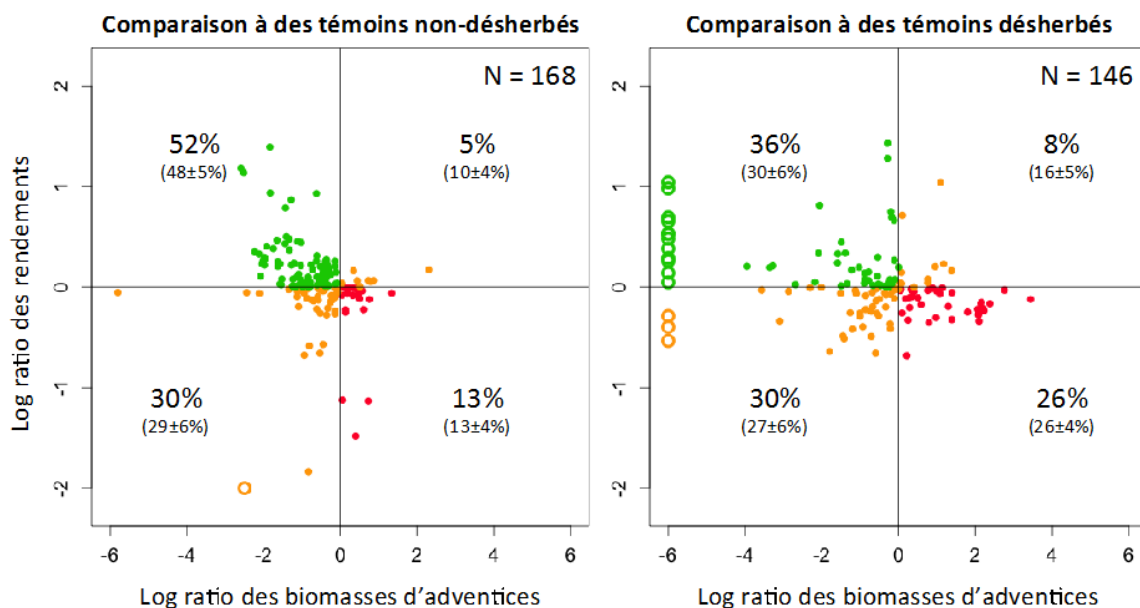


Figure 2 : Analyse des écarts au témoin sans plantes de services sur le rendement et la biomasse d'adventices sur l'ensemble des publications de la méta-analyse (Projet ALLIANCE).

1.2.3 Etat des lieux des expérimentations passées réalisées en France sur les associations à base de plantes de services.

Constitution d'une banque de données des essais passés d'associations colza-plantes de service :

Une banque de données « comparaison d'espèces de plantes de service associées au colza – toutes choses égales par ailleurs » a été compilée. Cette banque inclut 99 essais où le facteur principal variant d'une modalité à l'autre était l'espèce de plante de service. Les essais reportés ont été menés depuis 2009 par différents réseaux :

- Réseau d'essais du CASDAR Picoblé (2009-2012) (17 essais)
- Essais menés par les chambres d'agriculture, hors projet CASDAR (42 essais)
- Réseau d'essais du Cetiom/Terres Inovia (2011-2014) (15 essais)
- Expérimentations de thèse de Mathieu Lorin (2012-2014) à l'UMR d'Agronomie (8 essais)
- Réseau d'essais du CASDAR Alliance (2014-2016) (17 essais)

Les expérimentateurs des différents réseaux ont été sollicités pour partager leurs données d'essais depuis le début de leurs expérimentations sur le thème. Les données ont été renvoyées, le plus souvent sous la forme de fiches d'essai, et ont été rentrées dans la banque de manière standardisée. Au total, la

banque inclut plus d'un millier de conditions culturales particulières (site, année, espèce de plante de services, itinéraire technique). La banque contient aussi bien des essais analytiques en blocs répétés (60% des essais repertoriés) que des tests en bande d'agriculteurs (40% des essais). Une vingtaine d'essais non récoltés ont été intégrés à la banque, afin de capitaliser aussi les échecs rencontrés par le passé.

Description des essais

Les essais repertoriés se situent majoritairement dans la moitié nord-ouest de la France, une zone bien représentative de la zone de culture du colza en France (Figure 3). Ces essais couvrent les grandes zones de production du colza en France. Dans ces essais, 16 espèces de légumineuses et 4 espèces de non-légumineuses ont été associées au colza, seules (1 espèce à la fois avec le colza) ou en mélange d'espèces (plusieurs espèces avec le colza), pour un total de 61 modalités différentes d'association. Six modalités d'espèces et mélanges d'espèces ont été testés dans une majorité de sites et ont fait l'objet d'une analyse plus détaillée que les autres modalités (Tableau 1).

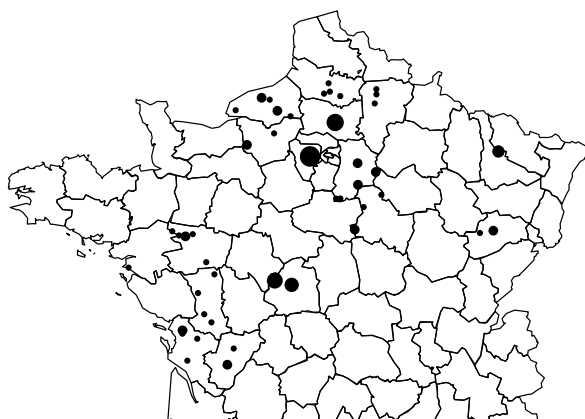


Figure 3 : Répartition des essais de colzas associés intégrés dans la banque de données.

Tableau 1 : Les 6 modalités les plus testées en association avec le colza dans la banque d'essais.

Modalité	Nombre d'essais
Féverole	49
Féverole et Lentille	70
Gesse commune, fenugrec et lentille (GFL)	47
Lentille	60
Pois protéagineux	42
Vesce commune, vesce pourpre et trèfle d'Alexandrie (VVC)	44

Conclusions de cette analyse

Les familles et les espèces de plantes de service diffèrent dans leurs effets de compétition et de facilitation envers la culture de colza. Des synergies sont observées pour quelques espèces qui fournissent plusieurs services sans concurrencer la culture.

- La féverole et le mélange de féverole + lentille ont montré les meilleures performances globales. À l'inverse, le pois est la seule légumineuse qui exerce une compétition souvent trop forte sur la croissance en biomasse du colza, présentant un effet «étouffant» pour le colza et pouvant impacter légèrement le rendement final. Elle est néanmoins capable d'exercer une forte compétition sur les adventices. Cette espèce est à mobiliser avec prudence. De même, les non-légumineuses ont un intérêt certain pour la production de biomasse et le contrôle des

adventices, mais sont trop concurrentielles pour être utilisées seules en association avec le colza. Leur incorporation dans des mélanges, à faible densité pour ne pas impacter négativement la biomasse du colza, sa nutrition azotée ainsi que son rendement, reste toutefois une option à ne pas écarter.

- La biomasse des plantes de service en entrée hiver sont un indicateur partiel de la production de services pour le colza. Une forte biomasse doit être recherchée pour obtenir ces services, mais elle ne doit pas créer une compétition trop importante pour le colza. Les espèces qui ont un comportement trop agressif comme le pois doivent donc être utilisées avec parcimonie.
- L'étude montre que les conditions environnementales et les pratiques agricoles influencent les performances de l'association de culture, notamment pour la production de biomasse de plantes de service et pour les différences de rendement observées à la récolte. L'association du colza à des plantes de service doit plutôt être réservée aux parcelles peu riches en azote, avec un semis précoce pour favoriser le développement des plantes de service grâce à un cumul important de températures et de rayonnement, en priorité dans des zones où les précipitations de fin d'été ne limiteront pas l'établissement et la croissance des plantes de service et du colza.

Pour plus d'informations sur cette étude, consulter la publication de Verret et al. (2017b).

Avant la fin du projet, l'ensemble de ces bases de données ont été fusionnées pour constituer un fichier unique avec l'ensemble des données du projet Alliance. Cette base de données a été intégrée dans le « Recensement des bases de données de pratiques et de références pour l'évaluation des performances en Grandes Cultures », <https://plateforme.api-agro.fr/> pour faciliter leur ré-utilisation :

<https://plateforme.api-agro.fr/explore/dataset/essais-casdar-alliance/>

2. Tester au champ la faisabilité technique de ces conduites techniques innovantes et quantifier au champ les services écosystémiques attendus par les plantes de services

2.1 Objectifs et démarches

Objectifs : Les objectifs généraux de cette action sont de :

1- Tester la faisabilité et la pertinence agronomique d'associations de plantes de service encore peu courantes : blé et légumineuses à l'automne.

2- Évaluer les services écosystémiques sur la culture en place et les suivantes pour les associations colza- ou blé-légumineuses à l'automne en agriculture conventionnelle et blé-légumineuses sous couvert au printemps en agriculture biologique.

Au terme du projet, cette action de tests et de quantifications au champ vise à établir des conseils de conduite culturale de ces associations, diffusés dans l'action 4.

Méthodes de travail utilisées

Cette action repose sur des activités expérimentales importantes, à coordonner entre différents acteurs. La nature des dispositifs mobilisés est de trois sortes :

- (1) des parcelles d'agriculteurs en réseau (CA, Lycées agricoles) :
 - pour tester la faisabilité technique pour les systèmes à base de blé associé à l'automne ou au printemps
 - pour quantifier les services et disservices produits par différentes espèces de plantes de service dans les associations en colza et en blé
 - pour évaluer de manière globale les performances agro-écologiques des itinéraires techniques des cultures associées (en colza et en blé).

(2) des essais en plateformes expérimentales (INRA, UMR Agronomie) ou parcelles d'agriculteurs avec un haut niveau de suivi (ISARA) pour réaliser des mesures plus précises sur les relations de compétitions ou de facilitations entre espèces. Ces essais analytiques ont fait l'objet de deux thèses : celle de M. Lorin (INRA, UMR agronomie) sur le fonctionnement du colza associé et celle de S. Vrignon (ISARA) sur le fonctionnement d'une association entre blé biologique et légumineuse de service.

(3) des essais en conditions semi-contrôlées pour étudier finement les processus racinaires (thèse d'E. Dayoub à l'ESA d'Angers, laboratoire LEVA).

Nous présentons ici les deux premiers types d'activités expérimentales.

2.2 Activités expérimentales en parcelles d'agriculteurs et plate-formes d'expérimentations

2.2.1 Association du colza d'hiver avec des plantes de service

Introduction

Les essais menés visent à évaluer des conduites de mélanges d'espèces de plantes de service. C'est dans ce sens qu'ont été menés 13 essais pour la campagne 2014-2015. Deux modalités ont retenu l'intérêt des partenaires du projet : le trèfle d'Alexandrie, et un mélange de féverole de printemps, vesce pourpre et trèfle d'Alexandrie, avec des conduites avec ou sans réduction d'intrants. Les évaluations ont inclus le calcul d'indicateurs agro-environnementaux, sociaux et économiques pour intégrer tous les effets de la pratique.

Comparer des conduites du colza associé

Sur chaque site (12 sites sur une partie nord ouest de la France), deux itinéraires techniques (ITK) de colza associé suivant chacun une logique propre (ITK « bas niveau d'intrants » *versus* « Productif ») sont donc comparés à un ITK de colza non associé, représentatif d'une conduite classique locale telle que conseillée régionalement par les chambres d'agriculture et Terres Inovia (Tableau 2).

Tableau 2 : Description des trois itinéraires techniques comparés. Les recommandations sont régionales, issues des conseils Chambre d'Agriculture et Terres Inovia.

	Colza seul (Référence)	Bas niveau d'intrants	Productif
Objectif de l'ITK	ITK témoin	<ul style="list-style-type: none"> Réduction des intrants (herbicide, insecticide et azote) Maintien de la marge si perte de rendement modeste 	<ul style="list-style-type: none"> Augmenter le rendement (+3 à 5qx/ha, +10%) sans augmenter les intrants
Espèces associées	-	2 modalités communes : <ul style="list-style-type: none"> Féverole pts (15gr/m²) + Vesce P (14 kg/ha) + T. Alexandrie (4 kg/ha) T. Alexandrie seul (6 kg/ha) + modalités au choix des expérimentateurs	
Date de semis	Selon recommandations	Semis du colza avancé d'une semaine Semis des espèces associées le même jour, technique de semis selon le matériel disponible	
Désherbage anticots	Stratégie post-semis/pré-levée : colzor trio	Aucun	Stratégie post-levée précoce : Demi-dose de Novall ou Alabama
Désherbage antigaminées	Si repousse de céréales ou graminées résistantes (Kerb)	Si repousse de céréales ou graminées résistantes (Kerb)	Si repousse de céréales ou graminées résistantes (Kerb)
Destruction du couvert	-	Gel ou LONTREL en mars	Callisto, Ielo/Yago en décembre (hâter la minéralisation)
Insecticides automne	Selon recommandations	Max 1 seul à l'automne Selon recommandation au printemps	Selon recommandations
Fongicides	Selon recommandations	1 seul au printemps	Selon recommandations
Azote	Réglette Azote	Réglette azote sur colza associé - 30 unités	Réglette azote sur colza associé

L'ITK « **bas niveau d'intrants** » (BNI) cherche, grâce aux services rendus par le couvert associé, à réduire l'utilisation de pesticides et d'azote minéral. Une perte modeste de rendement est autorisée et est compensée par la réduction des charges d'intrants. Le couvert associé peut réguler les adventices par une meilleure couverture du sol (impasse sur un traitement anti-dicot), perturber les insectes par une dilution de la ressource (réduction des insecticides) et améliorer la nutrition azotée du colza (réduction de l'azote). Un couvert facilement gélif est choisi afin de limiter le recours à une destruction chimique en sortie d'hiver. Un risque modéré sur les adventices, les insectes et les maladies est accepté sur la conduite du colza.

L'ITK « **Productif** » teste l'hypothèse selon laquelle le couvert associé permet d'augmenter le rendement sans augmenter les intrants, et donc en améliorant leur efficacité. Des processus de facilitation peuvent améliorer, entre autres, la nutrition azotée du colza. La conduite du colza associé est sécurisée et vise à réduire les risques de compétition du couvert associé sur le colza, notamment en détruisant systématiquement le couvert associé à l'entrée hiver par un passage d'herbicide.

- Les résultats économiques varient de manière importante d'un site à l'autre, mais en moyenne, l'ITK « BNI » augmente la marge semi-nette de la culture de colza par rapport au colza seul alors que l'ITK « Productif » a tendance à la dégrader (malgré le gain de rendement observé pour la modalité FVTA), quelque soit le scénario de prix de vente du colza et des intrants.
- Les critères sociaux, relatifs à la pénibilité du travail (nombre de passages de tracteurs et nombre d'heures de travail) sont tous les deux améliorés par l'ITK « BNI » mais dégradés pour l'ITK « Productif » par rapport au colza seul.
- La plupart des critères environnementaux sont améliorés par l'ITK « BNI » et dégradés par l'ITK « Productif » (Tableau 3). L'itinéraire « Productif » parvient à augmenter la production mais en dégradant tous les autres indicateurs de performances.

Tableau 3 : Récapitulatif des indicateurs de performances agronomiques, économiques, sociales et environnementales des itinéraires techniques testés. Les modalités TA et FVTA sont moyennées.

Indicateurs	ITK « BNI » (écart au colza seul)	ITK « Productif » (écart au colza seul)
Biomasse de légumineuse entrée hiver	-21% de biomasse dans « Productif » vs « BNI »	
INN entrée hiver	+0%	-8%
Adventices entrée hiver	Pas de différence	Pas de différence
Rendement	+0.2 qx/ha (+1%)	+2.2 qx/ha (FVTA ***) (+6%)
Marge semi-nette	+32€/ha	-15€/ha
Nombre de passages	-1.3	+ 0.6
Temps de travail	0 h/ha	+0.3 h/ha
IFT total	-1.4 (-25%)	-0.1 (-2%)
Fertilisation azotée	-22 N/ha	+10 N/ha
Consommation de fuel	+0%	+6%
Consommation d'énergie totale	-5%	+6%
Efficacité énergétique	+4%	-2%

2.2.2 Association du blé d'hiver avec des plantes de service en AB

Ce travail a fait l'objet d'une thèse qui avait pour principal objectif de mesurer les effets de la fertilisation sur les performances d'une association blé – légumineuses en plante compagne (rendement et qualité de la culture de vente et services rendus par la légumineuse) et de proposer des conduites culturales

pour optimiser le compromis entre production et services (décalage de la date de fertilisation, de semis, choix de l'espèce de légumineuse, de la variété de blé). Le semis d'un couvert de légumineuse fourragère (luzerne ou trèfle) sous couvert de blé est une technique utilisée en agriculture biologique pour répondre à deux facteurs limitants majeurs en grandes cultures bio : (i) limiter les carences en azote souvent observées et (ii) participer à la maîtrise du développement de la flore adventice. Le semis d'un couvert en association simultanée avec le blé, comme avec le colza, est en revanche peu pratiqué. Des essais ont été conduits pour tester la faisabilité de ces deux techniques dans différents contextes en France, et évaluer les services produits par différentes espèces de légumineuses ainsi associées au blé.

Les expérimentations ont montré que la fertilisation permettait d'améliorer le rendement et la teneur protéique des grains mais avait un effet très pénalisant sur l'installation de la légumineuse insérée en relai, diminuant les services attendus de la légumineuse par rapport à l'association simultanée. Cette dernière permettait d'obtenir un meilleur développement du couvert à la fin de l'association et semblerait limiter l'impact de la fertilisation sur les services rendus par la légumineuse.

En comparaison à un semis après la récolte du blé, le semis sous couvert au printemps permet aux légumineuses de se développer plus rapidement une fois le blé récolté. La phase d'installation du couvert au printemps est primordiale et s'avère très variable d'une espèce à l'autre et dépend des conditions printanières. Les trèfles violet ou d'Alexandrie, par exemple, présentent un développement rapide sous le couvert de blé alors que le trèfle blanc a un développement beaucoup plus lent. Les effets sur le blé sont négligeables, sauf en cas de développement important du couvert (diminution légère du taux de protéines) (Figure 4).

Le contrôle des adventices est directement lié à la biomasse produite avant la fin de l'été et ne sera effectif qu'après la récolte du blé, pendant l'interculture (Figure 5). Lorsque le couvert est maintenu jusqu'à l'hiver, les quantités d'azote fixées dépassent souvent 50kg N/ha et bénéficient à la culture suivante (Figure 6).

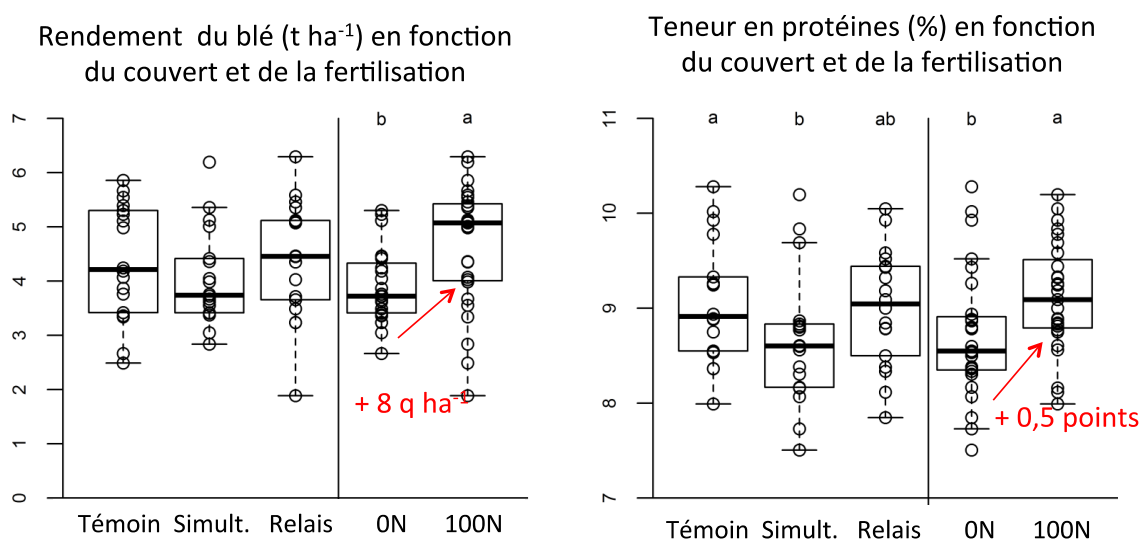


Figure 4 : Effet de la période d'association (simultané à l'automne ou relai au printemps) et de la fertilisation (0 vs 100 N) sur le rendement et le taux de protéines du blé.

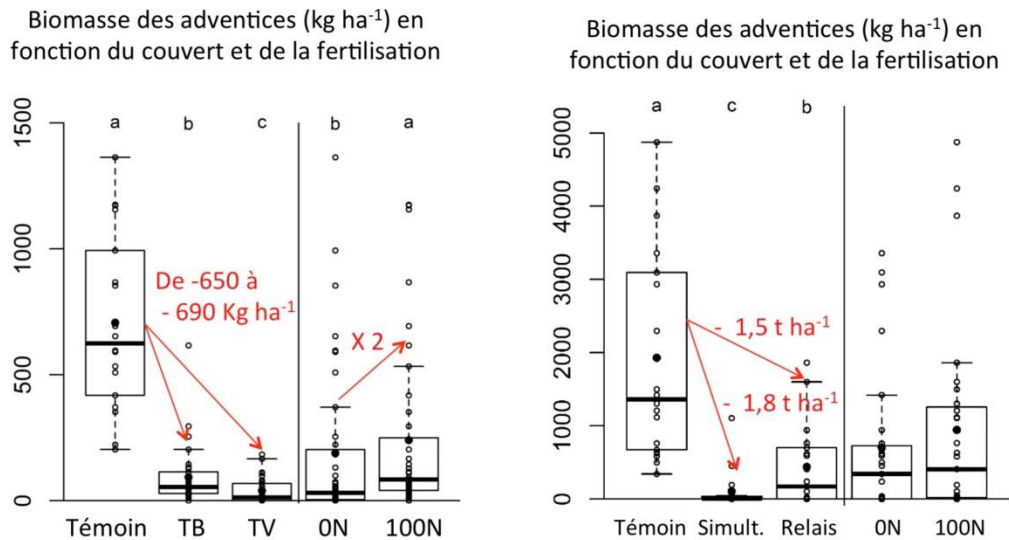


Figure 5 : Effet de l'espèce légumineuse (TB = trèfle blanc, TV : trèfle violet), de la période d'association (simultané à l'automne ou relais au printemps) et de la fertilisation (0 vs 100N) sur la biomasse des adventives à la fin de l'été, pendant l'interculture suivant le blé.

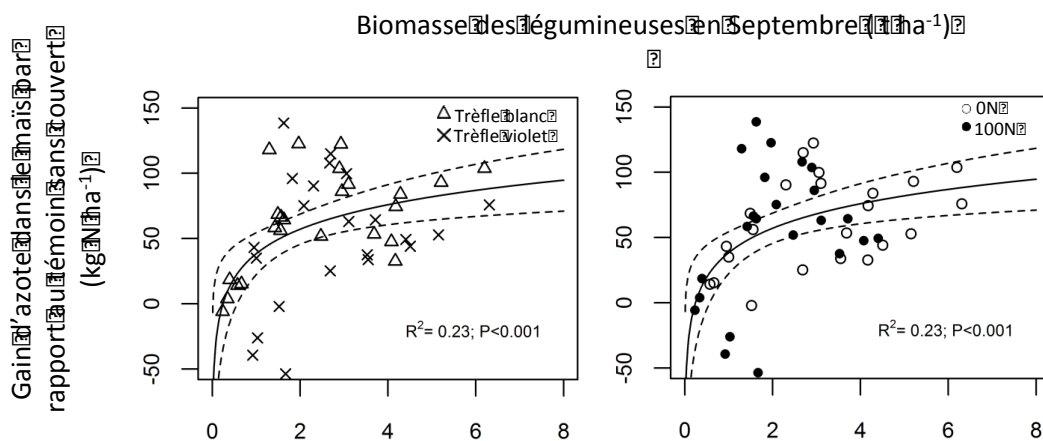


Figure 6 : Effet de la biomasse des légumineuses en fin d'été (septembre) sur le gain d'azote dans le maïs suivant l'association par rapport au témoin sans couvert (à gauche, comparaison des espèces de légumineuses associées au blé, à droite, comparaison des modalités de fertilisation).

Le semis du couvert à l'automne présente des biomasses au printemps plus importantes qu'en semis sous couvert. Cette technique permet de diminuer la variabilité des biomasses de couvert produites au printemps et ainsi de mieux garantir le contrôle des adventives, souvent même dès le printemps. Les quantités d'azote apportées dans le système sont également plus stables et parfois plus importantes qu'en semis sous couvert. En revanche, les risques de concurrence avec le blé associé sont également plus forts. Le choix de certaines variétés de trèfle blanc de type nain ou intermédiaire permet d'atteindre un meilleur compromis entre services attendus de la légumineuse et maintien des performances du blé associé.

3. Synthétiser, évaluer et extrapoler les résultats acquis à l'aide d'outils de simulation et de modélisation pour adapter ou produire des outils opérationnels pour les agriculteurs et techniciens

3.1 Objectifs et démarche

Rappel des Objectifs

L'objectif de ce travail est de valoriser les données acquises en expérimentation et par la bibliographie pour produire des outils de différentes sortes à destination de différents publics : outil d'évaluation des performances agronomiques et environnementales des couverts associés ; prototype d'outil pour aider au choix des espèces de plantes de services à associer.

Méthodes de travail utilisées

Pour chacun de ces outils, l'ensemble des partenaires a été consulté lors d'ateliers de travail collectif à l'occasion des assemblées générales du projet ou de journées dédiées afin de mobiliser les expertises de chacun sur différents thèmes : les Chambres d'agriculture pour leur expertise sur des itinéraires techniques de références en colza, sur un outil d'évaluation des restitutions d'azote par les CIPAN (outil MERCI), les chercheurs et enseignants-chercheurs pour leurs connaissances des processus, et Jouffray-Drillaud pour les connaissances sur les caractéristiques biologiques des espèces et variétés de légumineuses.

3.2 Un outil d'évaluation multicritère des systèmes de culture intégrant les plantes de service associées

Le travail effectué dans cette tâche avait pour objectif de construire une batterie d'une dizaine d'indicateurs agronomiques, économiques, environnementaux et sociaux relativement simples à calculer avec les données disponibles, qui puissent caractériser de manière globale les performances de l'association colza-légumineuses gélives à l'échelle de la culture, puis de mettre à l'épreuve ces indicateurs dans différents cas. La démarche s'est articulée en trois étapes : (i) le choix de critères pertinents et facilement calculables, (ii) l'adaptation de leur calcul à l'association colza-légumineuses gélives, (iii) la mise à l'épreuve des indicateurs sur des données provenant d'essais réalisés dans le cadre du CASDAR et dans des projets antérieurs d'une part (base de données « colza associé » compilée dans l'action 1), et d'autre part des itinéraires techniques types construits avec l'expertise des Chambres Départementales d'Agriculture.

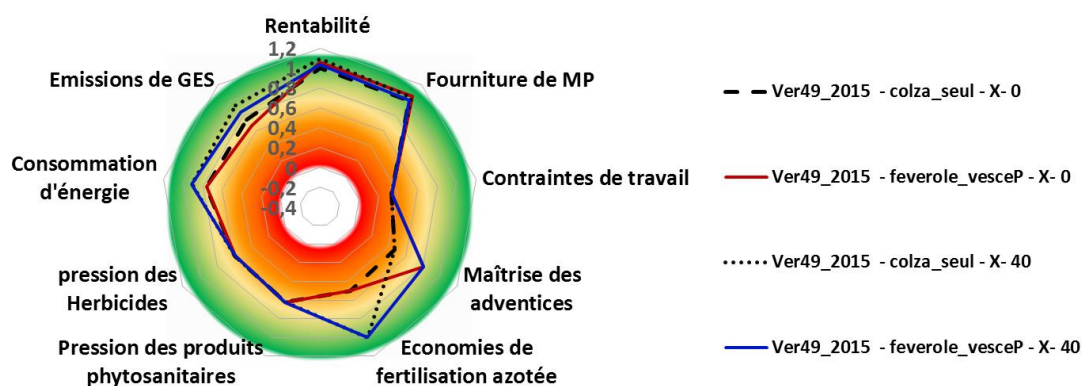
À partir d'outils existants (mais non spécifiquement adaptés à la problématique des couverts associés, tels que les outils MASC, INDIGO, DEXIPM, etc.), huit indicateurs finaux ont été sélectionnés et adaptés pour appréhender les performances socio-économiques, agronomiques et environnementales de l'association du colza associé à des plantes de service gélives (Tableau 4).

Un certain nombre d'indicateurs, faute de données récoltées ou de références scientifiques précises, ne pouvaient pas être évalués de manière assez satisfaisante et n'ont pas été intégrés à la batterie d'indicateurs. C'est le cas par exemple des indicateurs suivant issus de MASC : « maîtrise du statut organique », « maîtrise de l'érosion », « dépendance vis-à-vis de la ressource en eau ».

Ces indicateurs ont été mis à l'épreuve à plusieurs occasions au cours du projet Alliance (sur des anciens essais compilés dans la base de données et sur les essais itinéraires techniques mentionnés plus haut). Ces différentes mises à l'épreuve ont permis de vérifier que ces huit indicateurs retenus sont plutôt bien adaptés à l'évaluation des colzas associés. Ils permettent effectivement d'appréhender les performances économiques, sociales, agronomiques et environnementales de cette pratique. Les indicateurs se sont révélés sensibles (Figure 7) et ont permis d'expliciter les raisons de la variabilité de performance des itinéraires techniques. En se plaçant à l'échelle de la culture, ils ont pu être calculés avec les données facilement disponibles.

Tableau 4 : Huit indicateurs finaux pour appréhender les performances socio-économiques, agronomiques et environnementales de l'association du colza à des plantes de services gélives (Projet ALLIANCE).

	Indicateur	Origine	Formule	Modification
indicateurs socio-économiques	1 Rentabilité	MASC	Marge Nette	Prise en compte des charges de mécanisation (barème)
	2 Fourniture de Matières Premières (MP)	MASC	ratio du rendement colza associé/colza seul	Raisonnement en comparatif par rapport au colza seul
	3 Contraintes de travail	agrégation de critères MASC	arbre DEXi	Agrégation de critères MASC via DEXi
indicateurs agronomiques	4 Maîtrise des adventices	MASC	ratio des biomasses d'adventices/colza seul	Passage à un indicateur de résultats (si disponible), lié à la quantité d'adventices
	5 Economies de fertilisation azotée	agrégation de critères MASC	différentiel de fertilisation azotée	Simplification: on considère seulement la dose d'azote apportée
indicateurs environnementaux	6 Pression des produits phytosanitaires	MASC	calcul de l'IFT total et de l'IFT herbicides du colza	Simplification: dose appliquée (IFT), sans compartimentation
	7 Emissions GES	Gest'im	calcul Gest'im	Prise en compte de seulement certains compartiments
	8 Consommation en Energie	MASC/Gest'im	calcul Gest'im	Prise en compte de seulement certains compartiments

**Figure 7 :** Évaluation multicritère de la performance des colzas associés (exemple d'un couvert féverole-vesce pourpre) dans l'essai de la CA49 de la saison 2014-2016 (Projet Alliance rapport final).

3.3 Un outil pour agréger les connaissances sur les traits des espèces et pour aider au choix de la plante de services à associer

Au commencement du projet, il apparaissait que les conseillers techniques et les agriculteurs étaient en demande d'un outil d'aide à la décision pour le choix des espèces à associer au colza selon le type de services attendus. Cela s'est confirmé tout au long du projet, par les discussions tenues avec différentes parties prenantes. Un outil à la double finalité opérationnelle et pédagogique a été co-construit par l'UMR Agronomie, en mobilisant les futurs utilisateurs, dans ce but d'agréger et de rendre disponible aux agriculteurs, techniciens et étudiants ces connaissances scientifiques et expertes sur les associations de culture à des plantes de services.

Les principales étapes suivies pour l'élaboration de cet outil d'intégration et de partage des connaissances qui vise à classer des espèces candidates - plantes de service à associer au colza en fonction de leur capacité à fournir trois services principaux (azote, adventices, insectes), ainsi que des services secondaires sont détaillées ci-après :

- **Recensement des outils existants et des besoins des utilisateurs**

Les outils visant à aider au choix d'espèces sont courants pour les applications en cultures intermédiaires en grandes cultures. Quelques outils conseillent des espèces pour des usages « plantes de service », sans que cela ne soit applicable au colza, avec par exemple l'outil SIMSERV (plantes de couverture en bananier) et OSCAR cover crop and living mulch decision support tool (couverts végétaux temporaires et permanents en grandes cultures). Les outils sont généralement assez peu transparents. L'équipe-projet a privilégié une approche participative pour faire en sorte qu'un nouvel outil réponde à un besoin réel de ses futurs utilisateurs, dans le but qu'il soit effectivement utilisé. Des enquêtes et des ateliers collectifs ont permis de statuer sur les différents objectifs de l'outil, en lien avec les attentes des futurs utilisateurs.

- **Modélisation des liens entre traits des espèces et services rendus**

Les services écosystémiques recherchés lors de l'association ont été décomposés en processus bio-géo-chimiques par lesquels les services se réalisent. Les traits fonctionnels (ou caractéristiques des plantes) impliqués dans ces processus ont été listés ainsi que les conditions agro-pédo-climatiques qui sont susceptibles d'impacter les performances des espèces (approche fonctionnelle, largement utilisée en écologie et maintenant en agronomie). Cela a été réalisé par consultation des « futurs » utilisateurs de l'outil (conseillers de chambres d'agriculture et ingénieurs d'instituts techniques) lors d'ateliers participatifs, et par étude bibliographique. Ainsi, un tableau relationnel « traits-fonctions-services » a été constitué (exemple en Tableau 5). Au cours de nouveaux ateliers rassemblant des partenaires experts de chacun des services rendus par l'association, le tableau a été simplifié puis traduit en un modèle d'agrégation multicritère dans le logiciel informatique DEXI. Le modèle, construit par consensus entre les experts, agrège les traits des espèces et les conditions agro-environnementales pour donner une note de réalisation des services.

- **Base de données de traits d'espèces**

Vingt-trois traits des plantes de service ont été sélectionnés pour être intégrés comme données d'entrée dans le modèle DEXI. Ces traits ont été caractérisés pour une vingtaine d'espèces plus ou moins couramment utilisées en association avec le colza, en compilant des données issues de bases de données d'écologie des plantes, des mesures au champ, de publications scientifiques, de livres techniques et d'expertise. Toutes les valeurs de traits recueillies ont été synthétisées (passage en classes qualitatives) dans un tableau récapitulatif montrant la qualité de l'information présentée (en fonction du nombre de sources compilées et de leur fiabilité). Avec quelques données renseignées par l'utilisateur sur la parcelle et son contexte, ces informations permettent de réaliser les simulations avec le modèle. Le modèle a été validé en comparant des simulations de l'outil à des données expérimentales.

Tableau 5 : Exemple de décomposition du service « adventices » et de ses trois sous-services en fonctions, traits et facteurs agri-environnementaux influençant la réalisation des fonctions (Projet Alliance- rapport final).

Services	Sous-services	Fonctions (ou processus biologique)	Traits - Caractéristiques des plantes	Facteurs de l'environnement influençant la réalisation de la fonction	Facteurs agronomiques influençant la réalisation de la fonction
Réduction de la pression adventices (et des herbicides)	Réguler les adventices annuelles à l'automne	Limitation de la germination et du développement des adventices par compétition (lumière, azote)	Pouvoir allélopathique Rapidité de développement (taille de graine) Port couvrant/étalé (envergure) Surface foliaire étendue	Niveau d'infestation de la parcelle Caractéristiques de la communauté adventices (date et précocité de levée des espèces, nature des espèces (dicots, graminées))	Densité de semis de la plante de service Semis sur le rang ou sur l'interrang, en ligne ou en plein Réduction du stock semencier (faux semis) Pratiques qui limitent le flux de terre (Semis direct)
	Réguler les adventices annuelles au printemps	Limitation de la germination et du développement des adventices : effet mulch mort Limitation de la germination et du développement des adventices : compétition d'un mulch vivant (lumière, azote)	Pouvoir allélopathique du mulch mort Quantité de mulch Port du mulch (masse en contact du sol) Résistance au gel	Caractéristiques de la communauté adventices (date de levée des espèces, nature des espèces (dicots, graminées))	Programme de désherbage
	Réguler l'orobanche rameuse	Limiter la germination de l'orobanche rameuse	Espèce hôte qui déclenche la germination de l'orobanche	Disponibilité en eau (active la germination)	-

▪ Validation de l'outil et mise en ligne

Cet outil a été présenté à la plupart des partenaires du projet Alliance afin de recueillir leur avis sur son intérêt et son ergonomie (Est-ce que les données à renseigner sont simples et accessibles ? Est-ce que les résultats sont clairs et utiles ?). En parallèle, les sorties de l'outil ont été comparées à des données expérimentales disponibles dans la banque de données constituée pour l'action 1.

L'outil a été protégé temporairement d'un creative common licences et est en ligne en accès gratuit sur : <https://www6.versailles-grignon.inra.fr/agronomie/Recherche/Les-biodiversites-et-les-services-ecosystemiques-rendus/Projet-CASDAR-Alliance>

Remerciements

L'équipe-projet remercie :

- Les membres du comité de pilotage pour leur présence aux réunions et leurs conseils avisés ;
- Les semenciers RAGT et Agri-Obtentions pour les semences offertes pour la mise en place des essais en blé d'hiver associé aux légumineuses ;
- Le ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et de la Forêt pour le financement ;
- Terres Inovia et les chambres d'Agriculture de Loire-Atlantique, de Haute-Saône, de la Vienne et de l'Yonne pour leur contribution à l'alimentation de la base de données d'essais « colzas associés ».

Références bibliographiques

Lorin M., Jeuffroy M.-H., Butier A., Valantin-Morison M., 2015. Undersowing winter oilseed rape with frost-sensitive legume living mulches to improve weed control. *European Journal of Agronomy* 71, 96–10.

Malézieux E., Crozat Y., Dupraz C., Laurans M., Makowski D., Ozier-Lafontaine H., Rapidel B., Tourdonnet S., Valantin-Morison M., 2009. Mixing Plant Species in Cropping Systems: Concepts,

Tools and Models. A Review. *Agronomy for Sustainable Development* 29 (March): 43–62. <https://doi.org/10.1051/agro:2007057>.

Meynard J. M., Dedieu B., Bos A. P., 2012. Re-design and co-design of farming systems. An overview of methods and practices. In: Ika Darnhofer, David Gibbon, Benoît Dedieu, dir., *Farming Systems Research into the 21st Century: The New Dynamic*. Editions Springer. DOI : 10.1007/978-94-007-4503-2_18

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

Verret V., Gardarin A., Makowski D., Lorin M., Cadoux S., Butier A., Valantin-Morison M., 2017. Assessment of the Benefits of Frost-Sensitive Companion Plants in Winter Rapeseed. *European Journal of Agronomy* 91 (November): 93–103. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2017.09.006>.

Vrignon-Brenas S., Celette F., Amossé C., David C., 2016. Effect of spring fertilization on ecosystem services of organic wheat and clover relay intercrops. *European Journal of Agronomy* Vol.72.

Wezel A., Bellon S., Doré T., Francis C., Vallod D., David C., 2011. *Agroecology as a science, a movement and a practice*. Sustainable Agriculture, 1st ed.; Springer: Dordrecht, The Netherlands, 2, 27–43. DOI 10.1007/978-94-007-0394-0_3

Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY-NC-ND 3.0)



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/fr/>

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* », la date de sa publication, et son URL)