



**HAL**  
open science

# De l'analyse des performances et du fonctionnement des associations d'espèces à leur insertion dans les systèmes de culture et les filières

Laurent Bedoussac

► **To cite this version:**

Laurent Bedoussac. De l'analyse des performances et du fonctionnement des associations d'espèces à leur insertion dans les systèmes de culture et les filières. Sciences du Vivant [q-bio]. Institut National Polytechnique (Toulouse), 2018. tel-02788109

**HAL Id: tel-02788109**

**<https://hal.inrae.fr/tel-02788109>**

Submitted on 5 Jun 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.

# Mémoire en vue de l'obtention de l'Habilitation à Diriger des Recherches



**Université de Toulouse  
Institut National Polytechnique de Toulouse**

## **De l'analyse des performances et du fonctionnement des associations d'espèces à leur insertion dans les systèmes de culture et les filières**

**Laurent BEDOUSSAC**

**Maître de conférences en agronomie à l'ENSFEA**

**AGIR, Université de Toulouse, INRA, ENSFEA, Castanet-Tolosan, France**



**Présentée le 6 décembre 2018 devant le jury composé de :**

ALLETTO Lionel, Chargé de mission chambre régionale d'agriculture Occitanie, INRA UMR AGIR, Rapporteur

HINSINGER Philippe, Directeur de recherche, INRA UMR Eco & Sols, Rapporteur

JEUFFROY Marie-Hélène, Directrice de recherche, INRA UMR Agronomie, Rapporteur

JENSEN Erik Steen, Professeur, Swedish University of Agricultural Sciences, Examineur

JUSTES Éric, Cadre scientifique, CIRAD, UMR SYSTEM, Examineur

WATSON Christine, Professeur, Scotland's Rural College, Examineur

JOURNET Etienne-Pascal, Chargé de recherche, CNRS LIPM, INRA UMR AGIR, Correspondant

*« A la base de toute recherche scientifique il y a cette chose que l'on appelle le choix expérimental qui est qu'entre des millions d'expériences qu'on pourrait faire à propos d'une certaine chose on en choisi une au détriment de tout le reste »*

Salvador Dali

*« L'agriculture est le premier métier de l'homme ; c'est le plus honnête, le plus utile et par conséquent le plus noble qu'il puisse exercer »*

Jean-Jacques Rousseau, Émile ou De l'éducation

*« On a trouvé, en bonne politique, le secret de faire mourir de faim ceux qui, en cultivant la terre, font vivre les autres »*

Voltaire, Le Sottisier

*« Pour faire servir la nature aux besoins de l'homme, il faut obéir à ses lois »*

Francis Bacon

# REMERCIEMENTS

## REMERCIEMENTS

### **Je dédie ce travail à Bertrand Ney, professeur à AgroParisTech qui nous a quitté trop tôt en octobre 2013.**

J'ai eu la chance d'avoir Bertrand Ney comme enseignant quand j'étais étudiant à Paris-Grignon et le cours qu'il a donné en cette année scolaire 2002-2003 sur la modélisation du fonctionnement des peuplements végétaux reste à jamais gravé dans ma mémoire et a grandement contribué à m'orienter vers la recherche en agronomie. Merci aussi à Thierry Doré, un autre professeur qui me laisse un souvenir impérissable et qui en plus de m'avoir transmis une partie de ses connaissances m'a donné le goût de l'enseignement et de la recherche en agronomie.

Quand je suis arrivé à l'UMR AGIR en 2006 pour faire mon stage de fin d'étude avec Éric Justes j'étais loin de penser que je serai encore là 12 ans plus tard alors que toi tu déciderais en 2017 de rejoindre le CIRAD. Bien évidemment ce mémoire est en partie le tien et souvenons-nous que tu as initié ces travaux sur les cultures associées avec Jean-Marie Nolot en 2005-2006 et vous avez eu une très bonne idée quand on voit tout le chemin parcouru depuis. Éric, merci de m'avoir fait confiance, encouragé, accompagné et supervisé tout au long de ces années.

Jusqu'en 2010, Éric et moi nous n'étions qu'une association binaire comme les deux composantes des cultures associées et puis Etienne-Pascal Journet est arrivé. J'aime à penser que du fait de tes travaux antérieurs au CNRS sur les interactions plante-microorganisme tu as été un peu notre symbiote permettant de développer nos travaux avec un regard neuf, des compétences nouvelles et un tempérament radicalement opposé. Aujourd'hui on peut dire que tu es un vrai agronome et je te remercie d'avoir accepté d'encadrer ce mémoire et sache que j'apprécie énormément de travailler et plus largement d'échanger avec toi comme quoi les normaliens sont pleins de surprise.

Tout ce travail que nous avons mené depuis 12 ans sur les cultures associées n'aurait pu se faire sans une équipe de techniciens de qualité et donc je remercie Aurélie Navarre, Benoît Gleizes, Didier Chesneau, Didier Raffailac, Éric Lecloux, Marie-Pierre Monteil, Patrice Rouet, Patrick Petibon, Pierre Perrin et Michel Labarrère ainsi que tous les techniciens du domaine pour leur implication.

Je remercie également toute l'équipe administrative Christel Moder, Colette Quinquiry, Françoise Roux, Geneviève Santoro, Marina Lefebvre, Maryse Perreu, Mathieu Solle, Myriam Pierre, Nathalie Seguin, Sylvie Fernandes, Thierry Courbun, Thierry Criton ainsi que les informaticiens Areski Zerourou, Denis Baudet et Patrick Portale qui grâce à leur travail permettent de rendre la vie des chercheurs plus facile.

Je remercie aussi mes trois directeurs successifs de l'ENSFEA Véronique Bonne, Michel Bascle et Emmanuel Delmotte pour m'avoir accueilli en tant que maître de conférences et m'avoir permis de conduire mes travaux de recherche au sein de l'UMR AGIR sous la responsabilité successive de Michel Duru et Jacques Éric-Bergez qui tous deux m'ont apporté des conseils avisés tout au long de ces années.

La liste étant trop longue et de peur d'oublier certains je me contenterai d'un remerciement collectif à tous mes collègues de l'ENSFEA et de l'UMR AGIR ainsi qu'à tous les stagiaires que j'ai eu la chance d'encadrer et qui à l'inverse ont dû me supporter. J'ai une pensée toute particulière pour Bochra Kammoun et Loïc Viguière les deux doctorants que j'ai co-encadré et sans qui ce mémoire ne serait pas ce qu'il est.

Je terminerai par remercier ma famille, mes parents Martine et André, qui m'ont permis de faire les études qui m'ont amené jusqu'ici, mes grands-parents paternels qui exerçaient le dur mais beau métier d'agriculteur, ma grand-mère maternelle qui m'a donné le goût du jardin et des bons légumes, mon frère qui m'a toujours apporté son soutien et ses encouragements sans oublier Huguette et Laurent et bien sûr Laura qui m'accompagne depuis plusieurs années et qui doit supporter ma vie de chercheur qui ne déconnecte quasiment jamais.

# PREAMBULE

## PREAMBULE

Ce document présenté en vue de l'obtention de l'Habilitation à la Direction de Recherche présente un bilan synthétique de mes activités de recherche menées de 2006 à 2018 depuis ma thèse réalisée entre septembre 2006 et septembre 2009 puis depuis février 2010 en tant que maître de conférences en agronomie à l'ENSFEA, suivi par le projet de recherche que je propose de réaliser au sein de l'UMR AGIR dans les années à venir.

Pour ce faire, j'ai opté pour une présentation sous la forme de cinq chapitres en commençant par la présentation de mon **Curriculum Vitae** suivi du **Chapitre 1 Activités d'enseignement et perspectives** dédié à la description synthétique de mes activités d'enseignement et aux perspectives dans ce domaine. Le **Chapitre 2 Présentation synthétique de mes activités de recherche** a pour objectif de donner une vision d'ensemble de mes activités de recherche en présentant l'évolution de mes thèmes de recherche tout au long de ces 12 années ainsi que les différents projets qui ont permis le financement de ces travaux, sans oublier l'encadrement d'étudiants et les publications réalisées. Les **Chapitres 3 et 4** sont consacrés aux résultats de ma recherche présentant deux thèmes principaux développées au cours de ces dernières années à savoir : **Chapitre 3 Analyse multicritères des performances des associations** et **Chapitre 4 Processus explicatifs des performances des associations**.

Pour les **Chapitres 3 et 4** je me suis basé en grande partie sur l'article de synthèse publié en 2015 dans la revue *Agronomy for Sustainable Development* 35(3):911-935 sous le titre « **Ecological principles underlying the increase of productivity achieved by cereal-grain legume intercropping in organic farming. A review** » et co-signé par Bedoussac L., Journet E.-P., Hauggaard-Nielsen H., Naudin C., Corre-Hellou G., Jensen E. S., Prieur L., Justes E. Par ailleurs j'ai choisi d'inclure dans les **Chapitres 3 et 4** des focus (courts résumés sous forme d'encadrés) sur sept articles publiés et un article en cours de révision, afin d'illustrer certains points particuliers qui n'ont pas été développés ou seulement partiellement dans l'article de synthèse de 2015.

Dans le **Chapitre 5** j'expose enfin mon projet de recherche intitulé : « **Co-conception d'itinéraires techniques de cultures associées pour accroître et stabiliser la production et la qualité nutritionnelle en vue de leur intégration dans les systèmes de culture et les filières** ». Après une présentation du contexte, mettant en évidence que le système agricole est verrouillé et peu favorable aux associations, je développe les deux axes de mon projet de recherche : (i) **Axe 1 : traque aux innovations et co-conception d'itinéraires techniques avec les acteurs des filières, dont des entreprises spécialisées dans le machinisme agricole** et (ii) **Axe 2 : effet des associations sur l'accroissement et la stabilisation de la production et l'amélioration de la qualité nutritionnelle des graines**.

# CURRICULUM VITAE



**CURRICULUM VITAE DE LAURENT BEDOUSSAC**  
**MAITRE DE CONFERENCES EN AGRONOMIE ; ECHELON 6 ; CNECA 5**

ENSFEA  
2 route de Narbonne, BP 22687  
31326 CASTANET-TOLOSAN  
Tél : 0561753237  
laurent.bedoussac(at)educagri.fr

INRA-UMR 1248 AGIR-Equipe VASCO  
Auzeville-BP 52627  
31326 CASTANET-TOLOSAN  
Tél : 0561285246  
laurent.bedoussac(at)inra.fr



Né le 19/03/1981

Expériences professionnelles

- 2010-en cours** **Maître de conférence** à l'Ecole Nationale de Formation Agronomique de Toulouse  
**Disciplines :** *Agronomie ; Horticulture ; Viticulture-œnologie*
- 2010-en cours** **Chercheur associé** à l'INRA Toulouse – UMR INRA-INPT/ENSAT 1248 AGIR – Equipe VASCO  
**Thématiques :** *Agronomie ; Cultures associées ; Conception de systèmes de culture*
- 2006-2009** **Doctorat** – Institut National de la Recherche Agronomique UMR AGIR  
36 mois  
**Directeurs :** Éric JUSTES (IR ; UMR AGIR) et Daniel WALLACH (DR ; UMR AGIR)  
*Analyse du fonctionnement des performances des associations blé dur-pois d'hiver et blé dur-féverole d'hiver pour la conception d'itinéraires techniques*
- 2006-2009** **Monitorat** – Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Toulouse  
192h. éq. TD  
**Tutrice :** Annie OUIIN (Maître de conférence ENSAT)  
**Disciplines :** *Agronomie : 78h. ; Ecologie : 53h. ; SIG : 43h. ; Dynamique des populations : 16h.*
- 2006** **Stage master** – Institut National de la Recherche Agronomique UMR AGIR  
6 mois  
**Maître de stage :** Éric JUSTES (IR- ; UMR AGIR INRA)  
*Analyse de la dynamique de compétition pour la lumière dans les associations blé dur-pois d'hiver*
- 2005** **Stage césure** – Ambassade de France – New-Delhi ; Inde  
6 mois  
**Maître de stage :** Pierre André LHOTE (Attaché pour la Science et la Technologie)  
*Les Biotechnologies agricoles en Inde*
- 2004** **Stage césure** – Instituto de Ecologia AC – Xalapa ; Mexique  
6 mois  
**Maître de stage :** Mario E. Favila (Docteur)  
*Defensive volatile secretions of two Diplopod species attract the carrion ball roller scarab *Canthon morsei* (Coleoptera: Scarabaeidae). Bedoussac et al. (2007) *Chemoecology* 17:163-167*

Formations diplômantes

- 2006-2009** **Doctorat de l'université de Toulouse** – Institut National Polytechnique de Toulouse  
**Spécialité :** Agrosystèmes, écosystèmes et environnement  
**Président :** Thierry DORÉ (PR UMR Agronomie INRA-AgroParisTech)  
**Rapporteurs :** Erik Steen JENSEN (PR Swedish University of Agricultural Sciences)  
Marie-Hélène JEUFFROY (DR UMR Agronomie INRA-AgroParisTech)  
**Examineurs :** Jean-Pierre COHAN (Ingénieur, ARVALIS Institut du végétal)  
Marie-Laure NAVAS (PR Département ESP-Montpellier SupAgro)  
**Distinctions :** Prix Léopold ESCANDE 2009 de l'Institut National Polytechnique de Toulouse  
Prix Henri GAUSSEN 2009 de l'Académie des Sciences de Toulouse
- 2005-2006** **Master sciences et technologies du vivant** – Institut National Agronomique Paris-Grignon  
**Mention :** Sciences agronomiques, environnement, paysage ; **Mention :** Très Bien
- 2002-2006** **Ingénieur agronome** – Institut National Agronomique Paris-Grignon (75)
- 1998-1999** **Baccalauréat scientifique** – Spécialité mathématiques – Lycée Emile Duclaux (15)

Publications et communications ([https://www.researchgate.net/profile/Laurent\\_Bedoussac/](https://www.researchgate.net/profile/Laurent_Bedoussac/))

- 14 Articles (5 en premier auteur) dans des revues avec comité de lecture plus 2 en révision et 10 en préparation**
- 5 Chapitres d'ouvrage (3 en premier auteur)**
- 12 Articles (5 en premier auteur) dans des revues avec comité de lecture non référencées et 11 dans des revues techniques**
- 39 Communications orales (13 en premier auteur) en colloque avec actes**
- 19 Communications par poster (11 en premier auteur) en colloque avec actes**

# SOMMAIRE

## SOMMAIRE

<b>Remerciements</b> .....	<b>3</b>
<b>Préambule</b> .....	<b>5</b>
<b>Curriculum vitae</b> .....	<b>7</b>
Expériences professionnelles .....	8
Formations diplômantes .....	8
Publications et communications ( <a href="https://www.researchgate.net/profile/Laurent_Bedoussac/">https://www.researchgate.net/profile/Laurent_Bedoussac/</a> ).....	8
<b>SOMMAIRE</b> .....	<b>9</b>
<b>CHAPITRE 1 : ACTIVITES D'ENSEIGNEMENT ET PERSPECTIVES</b> .....	<b>15</b>
<b>Plan du chapitre</b> .....	<b>15</b>
<b>Résumé du chapitre</b> .....	<b>16</b>
<b>1. Présentation synthétique de mon activité d'enseignement</b> .....	<b>17</b>
<b>2. La formation des enseignants : le cœur de mon enseignement</b> .....	<b>18</b>
2.1. Synthèse de mon implication dans la formation des enseignants .....	18
2.2. Enseignements en didactique.....	18
2.3. Enseignements disciplinaires.....	19
2.3.1. Approche globale de l'exploitation.....	19
2.3.2. Enseigner l'agriculture biologique.....	20
2.3.3. L'expérimentation et la pédagogie.....	21
<b>3. Le master AgroFoodChain</b> .....	<b>22</b>
<b>4. Autres enseignements et formations</b> .....	<b>23</b>
4.1. Formations aux cultures associées.....	23
4.2. Formations à l'étranger.....	24
<b>5. Réflexions en terme d'enseignement</b> .....	<b>24</b>
<b>6. Perspectives en terme d'enseignement</b> .....	<b>25</b>

## SOMMAIRE

<b>CHAPITRE 2 : PRESENTATION SYNTHETIQUE DE MES ACTIVITES DE RECHERCHE.....</b>	<b>27</b>
<b>Plan du chapitre.....</b>	<b>27</b>
<b>Résumé du chapitre.....</b>	<b>28</b>
<b>1. L'UMR AGIR et l'équipe VASCO .....</b>	<b>29</b>
1.1. L'UMR AGIR .....	29
1.2. L'équipe VASCO .....	29
<b>2. L'historique de mes recherches.....</b>	<b>29</b>
2.1. Contexte et objectifs .....	30
2.2. L'étude du fonctionnement et des performances pour commencer .....	31
2.3. De l'étude du fonctionnement et des performances vers la conception d'itinéraires techniques.....	32
2.3.1. Renforcement des connaissances .....	32
2.3.2. Evaluation en condition agricole .....	32
2.3.3. Pris en compte des interactions génotype-environnement-conduite .....	33
2.3.4. Intégration des facteurs biotiques .....	33
2.4. De la conception d'itinéraires techniques vers la conception de systèmes de culture .....	33
2.5. De la conception de systèmes de culture vers des filières durables.....	34
2.5.1. La logistique des coopératives.....	34
2.5.2. La transformation des produits .....	35
2.6. Vers des approches multi-acteurs, pluridisciplinaires et multi-échelles .....	35
2.6.1. Développer les légumineuses à l'échelle des territoires .....	36
2.6.2. Travailler de concert avec Qualisol pour développer la lentille associée .....	36
2.6.3. Des plateformes multi-acteurs .....	37
<b>3. Encadrement de personnels, stagiaires et doctorants et autres comités.....</b>	<b>37</b>
3.1. Encadrement de personnels ENSFEA .....	37
3.2. Encadrement de stages .....	38
3.3. Comités scientifiques et jury .....	39
3.3.1. Comités de thèse .....	39
3.3.2. Jury de thèse .....	39
3.3.3. Comités scientifiques.....	39
3.3.4. Expertise et groupes de travail.....	39
<b>4. Communications scientifiques.....</b>	<b>40</b>
<b>5. Analyse de mon expérience .....</b>	<b>40</b>

## SOMMAIRE

<b>CHAPITRE 3 : ANALYSE MULTICRITERES DES PERFORMANCES DES ASSOCIATIONS .....</b>	<b>43</b>
<b>Plan du chapitre.....</b>	<b>43</b>
<b>Résumé du chapitre.....</b>	<b>44</b>
<b>Articles utilisés pour ce chapitre .....</b>	<b>44</b>
Article principal.....	44
Articles servant d'illustration .....	44
<b>1. Introduction générale sur les cultures associées .....</b>	<b>45</b>
<b>2. Amélioration des rendements .....</b>	<b>48</b>
<b>3. Amélioration de la teneur en protéines.....</b>	<b>49</b>
<b>4. Moins d'enherbement et de pucerons .....</b>	<b>50</b>
<b>5. Performance économique.....</b>	<b>53</b>
<b>6. Performance environnementale .....</b>	<b>57</b>
<b>7. Conclusions et perspectives.....</b>	<b>57</b>
<b>CHAPITRE 4 : PROCESSUS EXPLICATIFS DES PERFORMANCES DES ASSOCIATIONS.....</b>	<b>59</b>
<b>Plan du chapitre.....</b>	<b>59</b>
<b>Résumé du chapitre.....</b>	<b>60</b>
<b>Articles utilisés pour ce chapitre .....</b>	<b>60</b>
Article principal.....	60
Articles servant d'illustration .....	60
<b>1. Deux formes d'interactions.....</b>	<b>61</b>
<b>2. Intérêts et limites du LER.....</b>	<b>62</b>
<b>3. Les céréales sont plus compétitives .....</b>	<b>62</b>
<b>4. L'association augmente le taux de fixation mais diminue la quantité fixée .....</b>	<b>64</b>
<b>5. Acquisition de la lumière et de l'azote .....</b>	<b>67</b>
<b>6. Des avantages accrus à bas niveau d'N.....</b>	<b>69</b>
<b>7. Pourquoi un gain de protéines ?.....</b>	<b>71</b>
<b>8. Analyse du fonctionnement dynamique.....</b>	<b>75</b>
<b>9. Conclusion et perspectives .....</b>	<b>75</b>

## SOMMAIRE

<b>CHAPITRE 5 : PROJET DE RECHERCHE CO-CONCEPTION D'ITINERAIRES TECHNIQUES DE CULTURES ASSOCIEES POUR ACCROITRE ET STABILISER LA PRODUCTION ET LA QUALITE NUTRITIONNELLE EN VUE DE LEUR INTEGRATION DANS LES SYSTEMES DE CULTURES ET LES FILIERES.....</b>	<b>79</b>
<b>Plan du chapitre.....</b>	<b>79</b>
<b>Résumé du chapitre.....</b>	<b>80</b>
<b>1. Un système agricole verrouillé, peu favorable aux associations, malgré leurs intérêts agronomiques.</b>	<b>81</b>
1.1. Un système agricole verrouillé .....	81
1.2. Une organisation logistique des coopératives <i>a priori</i> compatible.....	81
1.3. La nécessité d'une coordination entre acteurs .....	82
1.4. Co-conception multi-acteurs et traque aux innovations : des outils pour le développement des cultures associées 83	
<b>2. Axe 1 : Traque aux innovations, co-conception et machinisme agricole .....</b>	<b>85</b>
2.1. Hypothèse 1 : traque et co-conception, des sources d'innovations produisant des questions de recherche .....	85
Démarche proposée pour la traque aux innovations et la co-conception .....	87
2.2. Hypothèse 2 : la performance économique dépend de l'optimisation conjointe de la récolte et du tri.....	87
Démarche proposée pour optimiser conjointement la récolte et le tri des graines .....	90
<b>3. Axe 2 du projet de recherche : Accroître et stabiliser la production et la qualité nutritionnelle.....</b>	<b>91</b>
3.1. Hypothèse 3 : les associations modifient la composition chimique des grains et leur qualité nutritionnelle .....	91
Démarche proposée pour l'analyse de la composition chimique des grains et de leur qualité nutritionnelle .....	92
3.2. Hypothèse 4 : les associations stabilisent la production face aux aléas .....	93
Démarche proposée pour évaluer la stabilité de la production face aux aléas.....	95
3.3. La modélisation pour aider à la conception d'itinéraires techniques et au criblage de variétés adaptées.....	98
Démarche proposée pour utiliser la modélisation pour concevoir des itinéraires techniques et cribler des variétés .....	99
<b>4. Conclusion .....</b>	<b>100</b>

## SOMMAIRE

<i>Références bibliographiques</i> .....	103
<i>Liste des figures</i> .....	117
<i>Liste des des encadres</i> .....	123
<i>Publications scientifiques (Articles et chapitres)</i> .....	125
Articles acceptés dans des revues avec comité de lecture.....	126
Articles en révision dans des revues avec comité de lecture .....	127
Articles en préparation pour être soumis à des revues avec comité de lecture.....	127
Chapitres d’ouvrage .....	127
Articles acceptés dans des revues avec comité de lecture non référencées.....	128
<i>Communications orales</i> .....	129
<i>Posters</i> .....	133

# CHAPITRE 1 : ACTIVITES D'ENSEIGNEMENT ET PERSPECTIVES

## Plan du chapitre

Résumé du chapitre	16
1. Présentation synthétique de mon activité d'enseignement	17
2. La formation des enseignants : le cœur de mon enseignement	18
2.1. Synthèse de mon implication dans la formation des enseignants	18
2.2. Enseignements en didactique	18
2.3. Enseignements disciplinaires	19
2.3.1. Approche globale de l'exploitation	19
2.3.2. Enseigner l'agriculture biologique	20
2.3.3. L'expérimentation et la pédagogie	21
3. Le master AgroFoodChain	22
4. Autres enseignements et formations	23
4.1. Formations aux cultures associées	23
4.2. Formations à l'étranger	24
5. Réflexions en terme d'enseignement	24
6. Perspectives en terme d'enseignement	25



### Résumé du chapitre

Mon expérience d'enseignement en tant que Maître de conférence à l'ENSFEA en agronomie en tant que contractuel puis stagiaire et enfin comme titulaire depuis le 1<sup>er</sup> septembre 2012 correspond en moyenne à 238 heures équivalent TD/an avec une forte variabilité interannuelle allant de 184 heures à 298 heures qui correspondent à :

**1) La responsabilité de la formation des enseignants lauréats des concours interne, externe et réservé** de l'enseignement agricole en productions horticoles et en viticulture-œnologie,

**2) La coordination des enseignements disciplinaires et de didactique en productions horticoles et en viticulture-œnologie du Master MEEF** (Métiers de l'Enseignement, de l'Education et de la Formation) dédié à la formation aux métiers de l'enseignement.

**3) La coresponsabilité pédagogique du Master AgroFoodChain (M1 et M2)** co-habilité par l'INPT et l'ENSFEA depuis la rentrée scolaire 2014 et auquel je participe activement en tant qu'enseignant.

Ces expériences m'ont permis de :

**1) Diversifier mes thématiques d'enseignement** allant de la didactique à travers l'analyse de référentiels, la construction de séance, de séquence et de progression à des enseignements techniques autour des cultures associées, de l'analyse globale d'exploitation agricole ou encore l'évaluation multicritères.

**2) Diversifier mes pratiques d'enseignement** que ce soit en présentiel ou à distance en variant les formes (cours, TD, visites), en les adaptant aux différents publics (Master vs Enseignants), en favorisant autant que possible une participation active des apprenants, en apportant une vision systémique, multi-scalaire et multi-acteurs et en adoptant une posture de formateur s'appuyant sur les expériences professionnelles et les savoirs des apprenants.

**La coresponsabilité du Master AgroFoodChain** avec la mise en place de la nouvelle maquette depuis la rentrée 2016 m'a appris à : (i) écrire un syllabus, (ii) fédérer, animer et coordonner une équipe pédagogique de 50 intervenants autour de ce nouveau projet, (iii) adapter le contenu de la formation année après année et (iv) être à l'écoute des étudiants en répondant à leurs attentes du mieux que possible.

**En terme de perspectives, les années à venir verront la création de ressources numériques** en particulier pour la formation continue des enseignants afin de construire des parcours de formation plus individualisés. Je souhaite également **conduire un travail approfondi sur les formes pédagogiques innovantes comme la classe inversée, l'approche par projet ou encore l'utilisation des outils numériques et des jeux sérieux** à la fois pour former les apprenants mais également pour outiller ces derniers afin qu'ils puissent s'approprier et remobiliser ces outils dans leurs formations.

## 1. Présentation synthétique de mon activité d'enseignement

Après une année en tant que maître de conférences contractuel et une expérience préalable d'enseignement en tant que moniteur pendant mon doctorat j'occupe depuis le 1er septembre 2011 un poste de Maître de conférence en tant que titulaire à l'ENSFEA.

Cette partie consacrée à mes activités d'enseignements porte sur la période 2010-2017 au cours de laquelle j'ai réalisé en moyenne **238 heures équivalent TD/an avec une forte variabilité interannuelle** allant de 184 heures en 2012-2013 à 298 heures en 2010-2011 (**Figure 1**).

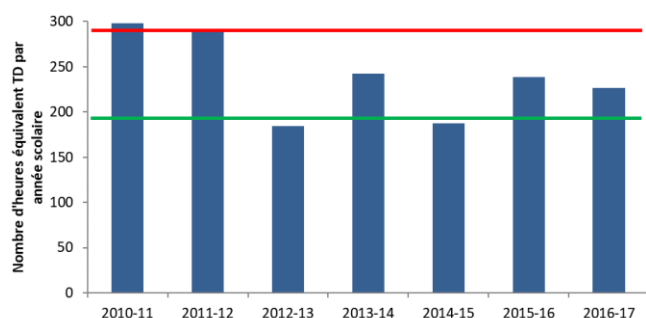


Figure 1 Evolution de mon service d'enseignement au cours des années scolaires 2010-2011 à 2016-2017.

En tant que Maître de conférence à l'ENSFEA ma **mission première est de participer à la formation post-concours et continue des enseignants de l'enseignement agricole** qui représente en moyenne 51% de mon service d'enseignement (**Figure 2**). Au-delà de cette mission principale mon service d'enseignement intègre trois autres missions : **(i) la formation aux métiers de l'enseignement, (ii) les formations diplômantes hors métier de l'enseignement et (iii) les autres activités d'enseignement.**

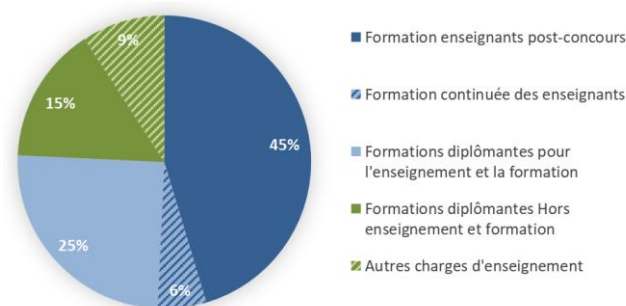


Figure 2 Part des différentes formations dans mon service d'enseignement en moyenne des années scolaires 2010-2011 à 2016-2017.

- **La formation des enseignants post-concours et continue** dont j'assume la responsabilité des sections productions horticoles et viticulture-œnologie représente 51% de mon service.
- **La formation diplômante aux métiers de l'enseignement** représente 25% de mon service et se fait dans le cadre du Master MEEF<sup>1</sup> dans lesquels je coordonne les unités d'enseignement disciplinaires et de didactique de la discipline en productions horticoles et viticulture-œnologie.
- **Les formations diplômantes hors métier de l'enseignement** représentent 15% de mon service et il s'agit principalement d'enseignements dans le cadre du Master AgroFoodChain dont je suis l'un des trois responsables depuis 2014.
- **Les autres activités** représentent 9% de mon service et sont constituées d'interventions dans la cadre de MOOC (Massive Open Online Course), de la préparation aux concours de l'enseignement agricole et d'activités d'enseignement auprès d'autres structures y compris à l'étranger.

<sup>1</sup> Depuis 2015, la formation des lauréats du concours externe se fait dans le cadre du Master 2 MEEF (Métiers de l'Enseignement, de

l'Éducation et de la Formation) qui est destiné à présenter et renforcer les connaissances et compétences requises pour l'exercice des métiers de l'éducation et de la formation.

## 2. La formation des enseignants : le cœur de mon enseignement

### 2.1. Synthèse de mon implication dans la formation des enseignants

Au cours de ces années j'ai assuré la **responsabilité de la formation de 55 enseignants dont 43 en productions horticoles et 12 en viticulture-œnologie (Figure 3)** issus des différents concours (ingénieurs de l'agriculture et de l'environnement, concours externe, concours interne et concours réservé mis en place dans le cadre du plan de dé-précarisation des agents contractuels de la fonction publique).

Cette mission qui est au cœur de mon activité d'enseignement présente une **forte variabilité interannuelle (Figure 3)** allant de 46h. éq. TD en 2010-2011 à 190h. éq. TD en 2013-2014. Cette variabilité s'explique par l'ouverture ou non des différents concours selon les années. Ma fonction m'amène à concevoir les temps de formation « en section disciplinaire » pour lesquels j'implique mes collègues afin de définir les apports aussi bien dans la discipline *sensu stricto* que dans la didactique de la discipline.

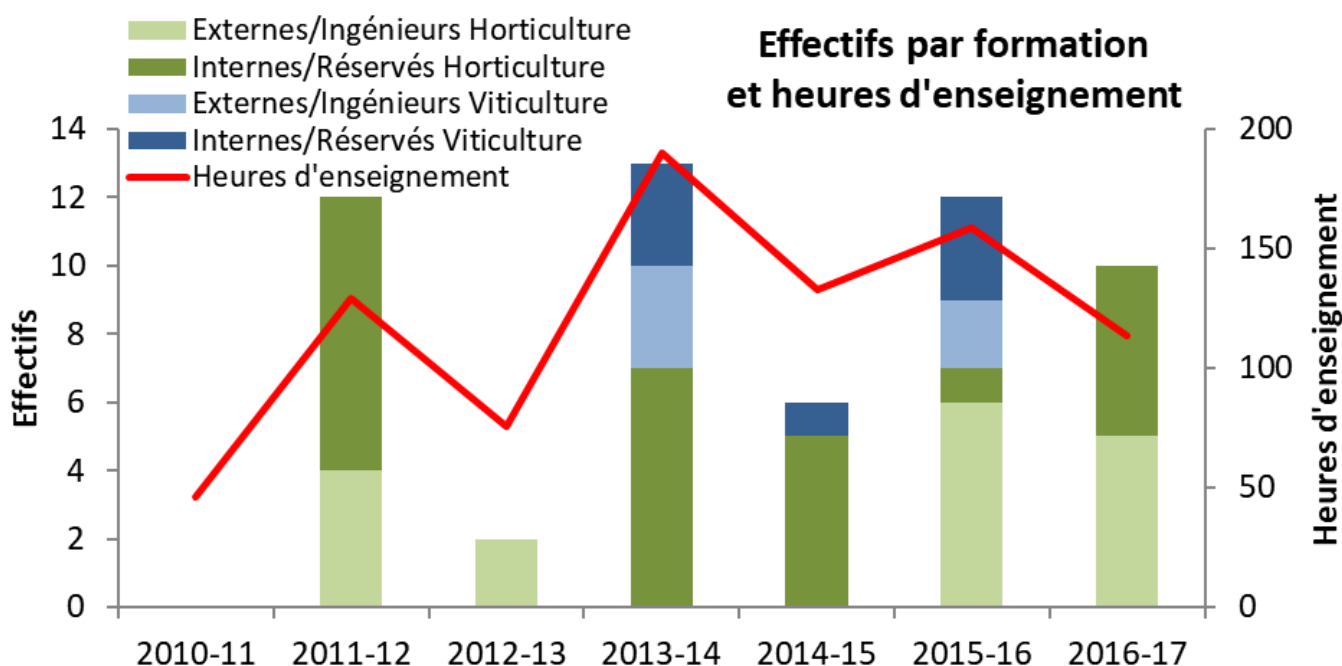


Figure 3 Evolution des effectifs d'enseignants formés et volume horaire dédié à leur formation au cours des années scolaires 2010-2011 à 2016-2017.

### 2.2. Enseignements en didactique

Les professeurs stagiaires internes et réservés possèdent une certaine expérience dans l'enseignement sur laquelle il est essentiel de s'appuyer pour mettre en œuvre **une démarche individualisée de déconstruction-construction de leurs connaissances et pratiques**. A l'inverse, les stagiaires externes et les

ingénieurs de l'agriculture et de l'environnement ont rarement une expérience d'enseignement sur laquelle s'appuyer. Dans ce cas il est nécessaire de **bâtir la formation autour des fondamentaux** que sont la construction de séance, de séquence et de progression. Dans tous les cas, j'accorde une place important à **l'autoformation et l'autocritique en favorisant les**

**échanges entre professeurs stagiaires.** Aussi, nombre de mes enseignements concernent la didactique comme par exemple :

- **La compréhension et l'interprétation des référentiels** qui est un incontournable autant pour les enseignants expérimentés que pour les néo-titulaires. En effet, ils doivent avant toute chose maîtriser les référentiels des diplômes et nous observons qu'ils en ont souvent une vision incomplète se focaliser essentiellement sur les modules dans lesquels ils interviennent.
- **L'autocritique par la mise en situation** visant à faire prendre conscience aux enseignants de leurs atouts et faiblesses ainsi que des décalages existants entre ce qu'ils veulent faire, ce qu'ils pensent avoir fait, ce que les autres perçoivent et ce qu'ils font réellement. Pour atteindre cet objectif, j'ai construit un scénario pédagogique au cours duquel l'enseignant conduit une analyse critique d'une courte séance filmée sur une thématique de son choix au cours de laquelle les autres professeurs jouent le rôle des élèves

### 2.3. Enseignements disciplinaires

Dans le cadre **des formations des enseignants post-concours et continues** je consacre une part de mon activité à l'enseignement de la discipline (productions horticoles et viticulture-œnologie). Cela me permet de faire certains liens avec mes activités de recherche que je vais illustrer à travers trois exemples : **(i) l'approche globale de l'exploitation agricole, (ii) enseigner l'agriculture biologique et (iii) l'expérimentation comme outil pédagogique.**

#### 2.3.1. Approche globale de l'exploitation

Cet enseignement d'une dizaine d'heures est réalisé en binôme avec M. Gafsi (ENSFEA). Il vise à

initier les enseignants à la démarche de l'approche globale de l'exploitation agricole (AGEA). En tant qu'action pluridisciplinaire, l'AGEA représente l'un des éléments forts de l'enseignement agricole. En effet, elle est présente dans pratiquement toutes les formations et de fait est utile pour des enseignants de différentes disciplines. **Cette démarche permet de découvrir et d'analyser la complexité de l'exploitation agricole, son fonctionnement et d'évaluer la durabilité** d'un point de vue agronomique, environnemental et socio-économique. Ce module vise donc à exercer les enseignants à la mise en œuvre de l'AGEA ainsi qu'à la conduite d'un diagnostic de durabilité sans oublier l'acquisition de compétences pour l'organisation et l'animation de visites d'exploitations. Pour ce faire nous avons structuré ce module en quatre temps :

1. **Préparation et visite d'une exploitation :** Après avoir élaboré collectivement une grille d'entretien les enseignants la mettent en œuvre dans une exploitation que nous avons choisi au préalable.
2. **Synthèse et construction du schéma de fonctionnement :** Cette séance vise à identifier les finalités, atouts et contraintes de l'exploitation pour ensuite réaliser le schéma de fonctionnement.
3. **Analyse de la durabilité :** Au cours de cette séances les enseignants doivent utiliser la grille d'évaluation multicritères IDEA afin d'évaluer la durabilité de l'exploitation selon les trois piliers.
4. **Mettre en œuvre l'AGEA avec sa classe :** Ce module se conclut par une réflexion collective sur la mise en œuvre de l'AGEA et de l'évaluation de la durabilité dans l'enseignement agricole en tenant compte du niveau des apprenants visés (BEPA, Bac Pro ou BTS).

Dans le cadre de mes enseignements j'utilise lorsque cela est pertinent les visites comme support pédagogique à la fois dans des exploitations agricoles, des coopératives ou des centres d'expérimentations (CEFEL, ITV et INRA). Au-delà du simple fait de montrer des exemples *in situ*, ces approches pédagogiques pratiques, visuelles et dans l'échange permettent de faire le lien avec des approches plus théoriques et favorise l'acquisition des connaissances par les apprenants. Dans la mesure du possible, j'essaye lors de ces visites de mobiliser des collègues (techniciens, chercheurs, doctorants ou stagiaires) afin qu'ils puissent présenter leurs travaux et leur métier.

### 2.3.2. Enseigner l'agriculture biologique

En réponse à une demande de l'inspection de l'enseignement agricole j'ai conçu **un stage de formation intitulé : « comment enseigner l'agriculture biologique en productions horticoles »**. Ce stage, d'une durée de trois jours a été réalisé en 2012-2013 et a accueilli dix enseignants. Il visait d'une part à faire acquérir des références techniques et d'autre part à identifier des modalités pédagogiques. En effet, les enseignants rencontrent souvent des **difficultés pour aborder l'agriculture biologique qui est globalement perçue par leurs apprenants comme un modèle en opposition à une agriculture conventionnelle dont ils sont majoritairement issus**. Or cela peut générer une « opposition culturelle » qui nécessite des approches pédagogiques adaptées s'appuyant sur la question des représentations. Pour répondre à ces questions le stage a été structuré en quatre temps :

**1. Positionnement des enseignants :** Cette séance introductive, sous la forme d'un remue-méninges, vise à faire le point sur l'état des connaissances et les *a priori* des enseignants sur l'agriculture

biologique. De plus il était demandé à chaque enseignant de préciser la place occupée par l'agriculture biologique dans leurs enseignements ainsi que les approches mobilisées et les difficultés rencontrées. En réponse, j'ai fait intervenir F.-X. Jacquin (inspecteur) pour préciser les attentes de l'inspection vis-à-vis de l'enseignement de l'agriculture biologique en lien avec le contenu des référentiels des diplômes.

**2. Représentations et rapports interculturels :**

Pour traiter de cette question j'ai choisi de débiter la séance par un jeu qui consiste à opposer deux groupes : les « pour » *versus* les « contre ». Chaque équipe devait formuler une liste d'arguments servant dans un second temps à contrer ceux de l'autre équipe sous la forme d'un ping-pong argumentaire. J'ai ensuite demandé à P. Sahuc (ENSFEA) d'intervenir pour faire part de ses travaux de recherche conduits en lycée agricole sur la question des représentations. Enfin, J.-M. Morin (Formabio) est venu présenter un jeu de cartes développé par le MAB29 et dont la finalité pédagogique est de mettre en œuvre des débats en classe sur l'agriculture biologique.

**3. Apports de connaissances :**

Pour cette partie technique j'ai fait intervenir différents professionnels : (i) S. Bonnot du GABB32 pour présenter les acteurs de l'agriculture biologique et donner des références technico-économiques, (ii) J. Pezet d'ECOCERT pour aborder la question du processus de certification et la réglementation, (iii) L. Espagnacq de la CA31 pour traiter de la fertilisation et de la protection des cultures en maraîchage, (iv) J.-F. Larrieu du CA82 pour la conduite des vergers biologiques, (v) J.-M. Morin pour présenter des ressources disponibles et valorisables par les enseignants et (vi) moi-même

pour initier aux méthodes et outils d'évaluation de la durabilité.

4. **Le terrain :** Au cours d'une journée nous avons visité le site expérimental du CEFEL en la présence d'E. Koke et M.-E. Biargues afin de connaître les recherches qui y étaient conduites. Cela m'a permis ensuite de faire le lien avec la place de l'expérimentation dans l'enseignement que je vais développer dans la partie qui suit.

### 2.3.3. L'expérimentation et la pédagogie

Parmi les cinq missions de l'enseignement agricole, il est stipulé que **les enseignants contribuent aux activités de développement, d'expérimentation et de recherche appliquée**. Or il apparaît que nombre d'entre eux ne connaissent pas clairement les étapes nécessaires à la mise en place d'une expérimentation. Cela peut se traduire sur le terrain par des essais mal conçus ne permettant pas l'acquisition correcte de références par les apprenants. D'autre part, l'expérimentation est souvent perçue comme un chose complexe si bien que les enseignants ont parfois tendance à évacuer cette approche pédagogique qui pourtant présente de nombreux intérêts didactiques.

Pour ces différentes raisons il me semble essentiel de former les enseignants à cette approche qui d'un point de vue pédagogique est l'occasion de : **(i) faire échanger, communiquer et partager des idées entre apprenants, (ii) prendre en compte leur curiosité, (iii) confronter et argumenter des opinions ou encore (iv) développer un esprit critique**. Dès lors, l'enseignant doit apprendre à changer de posture puisqu'il n'est plus totalement maître du contenu qu'il enseigne. En effet, il doit adopter une posture de « guide » permettant une appropriation progressive de la démarche scientifique, des connaissances et d'un esprit critique ce qui peut être relativement

déstabilisant. La séance de dix heures que j'anime sur ce sujet s'organise en quatre temps :

1. **Rappel des intérêts pédagogiques :** Dans cette partie je donne à voir aux enseignants les intérêts pédagogiques de l'expérimentation pour l'acquisition de connaissances mais également pour l'apprentissage de la démarche scientifique.
2. **Remue-méninges pour définir une expérimentation :** Cette partie consiste à questionner les enseignants afin d'évaluer l'état de leurs connaissances sur les différentes étapes à mettre en œuvre pour conduire une expérimentation à savoir : (i) en amont de l'expérimentation la définition du thème, du but, des facteurs étudiés, du matériel nécessaire, du dispositif expérimental, des variables à mesurer et sa valorisation pédagogique puis (ii) la conduite de l'essai et la collecte des données et enfin (iii) le traitement des données, la diffusion des résultats et l'analyse critique de l'expérimentation.
3. **Co-construction d'un exemple de protocole :** Afin d'explicitier les éléments précédents je co-construis avec les enseignants un protocole expérimental visant à comparer différentes façons de produire sur l'exemple du radis en intégrant entre autres la pénibilité du travail et la gestion des bioagresseurs.
4. **Projet d'expérimentation :** Cette dernière phase consiste, dans une volonté d'opérationnalisation, à demander aux enseignants de construire par groupe une situation pédagogique mobilisant l'expérimentation pour la mettre en place ultérieurement dans leur contexte professionnel.

### 3. Le master AgroFoodChain

Depuis l'année scolaire 2014-2015 j'assume la **fonction de coresponsable pédagogique du master AgroFoodChain<sup>1</sup>** avec G. N'Guyen (INPT-ENSAT) et N. Gallai (ENSFEA). Cette activité consiste à assurer le suivi des demandes d'inscription, à organiser l'emploi du temps, à organiser les jurys des différents semestres et à répondre aux sollicitations des étudiants. Au-delà de ces activités je réalise un certain nombre d'enseignements que je ne détaillerai par ici. A l'inverse **je présenterai dans la partie qui suit le travail que nous avons conduit dans le cadre de la réécriture du référentiel** qui a pris effet à la rentrée 2016 pour les M1. Il est à noter que ce nouveau référentiel a été accrédité par la DGER en tant que Master of Science and Technologie (MoST) dans la mention « Sciences de l'agriculture, de l'alimentation et de l'environnement ».

**Initialement, le master AgroFoodChain comprenait cinq spécialités** (Agriculture durable, agroéconomie, sécurité alimentaire, chimie verte et agro-génomique). Cette diversité rendait la cohérence du master difficilement compréhensible et ne permettait pas aux étudiants, ni à leurs futurs employeurs, d'être en capacité de clairement identifier les compétences acquises. Fort de ce constat, nous avons décidé, dans un processus collégial avec l'ensemble des enseignants du master, de le réorienter autour de **trois champs disciplinaires que sont l'économie, l'écologie et l'agronomie**. *In fine* cette formation vise dorénavant à **former des**

**professionnels capables d'analyser et de répondre aux problématiques émergentes des filières agricoles et agroalimentaires** telles que la sécurité alimentaire, la gestion durable des ressources biotiques et abiotiques, la transition agroécologique des filières ou encore la gestion des risques et des incertitudes au sein des filières.

Dans cette nouvelle maquette et en raison des finalités visées nous avons choisi de **privilégier une approche transversale pluridisciplinaire** avec la mise en œuvre autant que possible de **projets intégratifs** pour permettre aux futurs diplômés de développer une vision systémique des filières allant du champ jusqu'à l'assiette. Ainsi, au-delà des trois disciplines centrales du master (économie, écologie et l'agronomie) s'ajoutent **des disciplines dites « supports »** comme la génétique (végétale et animale), les sciences des aliments et de la nutrition, ou encore l'étude comportementale des consommateurs. A cela s'ajoutent **des unités d'enseignement permettant l'acquisition de compétences génériques** tels que la bureautique, les statistiques, le numérique (son et vidéo), la communication orale ou encore l'accompagnement professionnel à travers la rédaction de CV et de lettre de motivation. Toutefois, **l'une des spécificités de ce master tient dans le fait que ces modules viennent en appui aux enseignements disciplinaires afin de les rendre opérationnels**. A titre d'exemple, la présentation des outils de bureautique sont intégrés à des unités d'enseignement

<sup>1</sup> Le Master international AgroFoodChain a été créé en 2006-2007 par l'INPT-ENSAT, l'Université Paul Sabatier (UPS) et l'ENSFEA en partenariat avec 4 autres établissements (INPT-ENSIACET, INSA, INPT-Purpan et INPT-Véto) avec pour ambition d'attirer des étudiants anglophones sur le pôle toulousain via des enseignements dispensés intégralement en anglais. Depuis la

rentrée 2016 le master AgroFoodChain est seulement co-accrédité par l'INPT-ENSAT et l'ENSFEA en tant Master of Science and Technologie (MoST) dans la mention « Sciences de l'agriculture, de l'alimentation et de l'environnement ».

<https://toulouseagricampus.fr/Formation/Formation-initiale/Master-AgroFood-Chain>

où les étudiants doivent rédiger une synthèse écrite et utiliser des diaporamas pour des présentations orales.

Notons enfin, que **deux grands projets tuteurés sont mis en place** lors du premier semestre de chaque année. En M1 le projet sert à **contextualiser la formation** à travers une étude de cas visant à présenter et analyser une filière agroalimentaire de l'amont jusqu'à l'aval par le spectre des trois disciplines. En M2 le projet porte sur une problématique d'actualité des filières afin de **mettre en pratique les connaissances** acquises précédemment. Enfin, **la formation intègre deux stages**, l'un de deux mois en M1 et le second de six mois en M2 qui peuvent-être réalisés en laboratoire ou en entreprise, en France ou à l'étranger.

### 4. Autres enseignements et formations

#### 4.1. Formations aux cultures associées

Que ce soit à l'ENSFEA ou ailleurs **j'interviens régulièrement pour présenter mes travaux de recherche et ce pour une diversité de publics** : (i) élèves de lycée agricole (apprentis du CFPPA d'Auzeville et de Pau-Montardon, BTS APV d'Aix en Provence), (ii) élèves ingénieurs (Bordeaux Sciences agro, AgroCampus Ouest et ENSAT), (iii) enseignants, (iv) grand public et enfin (v) professionnels du secteur agricole (conseillers, techniciens ou agriculteurs).

Enseigner et transmettre des connaissances à des publics très divers, de surcroît en présentiel et à distance, en tenant compte des objectifs visés mais aussi de l'évolution des connaissances **nécessite une adaptation des supports aussi bien sur le fond que sur la forme**. J'ai choisi d'illustrer ce concept de transposition didactique à travers **quelques exemples d'enseignements et de communications sur les associations d'espèces**. Il est à noter que lors de ces différentes interventions l'objectif global était

sensiblement le même à savoir **montrer en quoi les cultures associées peuvent être vues comme une application des principes de l'écologie à l'agriculture** pour améliorer l'utilisation des ressources :

1. **Cours magistral classique en amphithéâtre** auprès d'élèves ingénieurs dans une approche didactique descendante,
2. **Cours dialogué pour les M1 AgroFoodChain**, pour favoriser les échanges et la participation des étudiants en les sollicitant régulièrement au travers de questions,
3. **Cours-TD pour la formation d'enseignants** alternant des apports théoriques avec de brèves séances de « remue-méninges » plaçant les apprenants dans la position d'un chercheur qui souhaite mettre en place une expérimentation sur les cultures associées et qui se termine par la visite d'essais menés à l'INRA sur ce thème,
4. **Transposition en FOAD** (Formation Ouverte et A Distance) sous la forme d'une leçon interactive enrichie de supports audio et vidéo devant se suffire à eux-mêmes et qui doivent donc être plus exhaustifs qu'en présentiel,
5. **MOOC Agroécologie** coordonné par S. De Tourdonnet (Montpellier SupAgro) à travers la création d'une intervention filmée, d'une évaluation et d'un tchat en live,
6. **Formation technique et atelier de co-conception** destinés à des conseillers agricoles, des techniciens et des agriculteurs,
7. **Intervention de vulgarisation auprès du grand public** comme par exemple dans le cadre de la nuit des chercheurs ou des conférences organisées par des associations avec l'utilisation de diaporamas épurés jusqu'à n'être constitués que d'images,



8. **Définition et vidéo réalisés dans le cadre du [dictionnaire d'agroécologie](#)** coordonné par Véronique Batifol de l'INRA Toulouse et disponible en ligne.

### 4.2. Formations à l'étranger

J'ai été invité en 2015 par des collègues de la China Agricultural University à participer à « **International Workshop of Intercropping for Agronomy and Ecology** ». Dans le cadre de ce déplacement en Chine je suis également intervenu auprès d'étudiants de la Northwest Agriculture and Forestry University de Yangling sur le thème : « **Intercropping cereal and grain legume: functioning and efficiency** ».

En 2017 j'ai également été sollicité par des collègues de l'université de Novi Sad (Serbie) pour intervenir dans le cadre de la « **International summer school in agrometeorology and crop modelling** » afin de donner une intervention intitulée « **Overview of intercrops models** ». Cette summer school coïncidant également avec la « **International summer school in Ethics: Challenges in crop management research and application intercrops** » j'ai également donné une intervention intitulée : « **Cereal-grain legumes in northern countries: how an agronomist try to activate the processes of positive interaction, integrating stakeholders issues?** ».

### 5. Réflexions en terme d'enseignement

Dans le cadre de mon activité à l'ENSFEA, ma fonction de responsable des formations des enseignants en productions horticoles et viticulture-œnologie m'a permis de **découvrir une autre facette du métier d'enseignant à savoir celui de formateur**.

En effet, le public concerné a généralement une certaine expérience professionnelle et il est donc

nécessaire d'adopter avec eux une posture particulière. Celle-ci consiste notamment à **s'appuyer sur leurs connaissances pour les conduire à apprendre à déconstruire leurs savoirs pour mieux les reconstruire**. Cette posture est relativement différente de celle que j'avais pu connaître lorsque j'étais moniteur et que j'enseignais auprès d'élèves ingénieurs. Il m'a donc fallu un certain temps d'adaptation rendu d'autant plus difficile du fait de mon manque de connaissances techniques en horticulture et viticulture.

Néanmoins, mon investissement dans l'acquisition de nouvelles compétences et dans la connaissance des référentiels ainsi que ma collaboration avec mes collègues m'ont permis de mener à bien ces activités et **je me considère aujourd'hui comme un « chef d'orchestre » mettant en musique les connaissances des enseignants** dans une logique de co-construction.

Au cours de ces années je me suis également confronté à la conception d'un plan de formation et d'enseignements adaptés à la FOAD et **cette expérience de l'enseignement à distance ne fut pas sans difficultés**. En effet, au-delà des difficultés techniques (création de supports vidéo, mise en ligne, tutoriels...), cela nécessite de **repenser intégralement ses enseignements pour que l'apprenant ne se sente pas isolé**. Je pense avoir réussi l'exercice même si des améliorations sont à apporter dans la gestion du temps de travail à distance, la construction de supports variés et la mise en place d'un suivi individualisé.

Enfin, la prise en charge pédagogique du Master AgroFoodChain a été l'occasion de me confronter à **l'écriture d'un syllabus qui a permis de mettre en œuvre une formation lisible, cohérente et de qualité**. En ce qui concerne la coordination des enseignements

qui mobilisent une cinquantaine d'intervenants, nous avons mis en place **un cloud permettant de gérer efficacement les emplois du temps et d'accéder aux différents documents administratifs à distance** (comptes rendus, courriers standards, relevés de notes...).

Enfin je tiens à souligner mon investissement dans la diffusion de mes connaissances sur les cultures associées qui traduit une volonté forte de tisser du lien entre la recherche et la société civile. Ainsi, **au cours de ces 12 années de recherche j'ai réalisé pas moins de 70 interventions sur le thème des cultures associées** et ceci sans compter celles réalisées dans le cadre de mes enseignements et des congrès scientifiques.

### 6. Perspectives en terme d'enseignement

Ma principale perspective en terme d'enseignement vise à **mettre en place une formation des enseignants qui soit réellement individualisée** afin de tenir compte de leur hétérogénéité. Pour ce faire, je vais continuer de travailler en étroite collaboration avec mes collègues didacticiens pour adapter le contenu de la formation en fonction des attentes et des besoins identifiés chez les enseignants. En effet, si certains apports sont systématiquement nécessaires, d'autres dépendent fortement de l'expérience préalable des enseignants. Dès lors, **il est nécessaire d'adapter les contenus des formations aussi bien d'une année sur l'autre qu'au cours de l'année en fonction des difficultés rencontrées.**

De même, j'espère pouvoir établir des liens plus étroits avec les autres unités d'enseignement ainsi qu'avec mes collègues formateurs en écologie, machinisme, sciences de l'éducation et langues pour plus d'interdisciplinarité. Enfin, bien que **mon**

**expérience m'a permis d'acquérir des compétences en didactique** liées à l'évaluation, à la construction de progressions, de séquences et de séances je dois dans les années à venir **mener un travail approfondi sur les formes pédagogiques innovantes** comme la classe inversée, l'approche par projet ou encore l'utilisation des outils numériques et des jeux sérieux.

Du point de vue des enseignements disciplinaires dans le cadre du Master MEEF il s'agira de **renforcer mes compétences en horticulture et viticulture-œnologie** ainsi que mon réseau pour être en capacité de faire intervenir des personnes extérieures pour les thématiques sur lesquelles je ne dispose pas des compétences nécessaires.

En ce qui concerne la formation continue des enseignants **j'envisage à l'avenir de proposer des formations à distance** qui seront plus compatibles avec les contraintes, les besoins et les attentes des enseignants. En effet, après avoir essayé de mettre en place de telles formations en présentiel, force est de constater qu'il s'avère délicat de mobiliser les enseignants. Pour autant, il existe des besoins réels, identifiés par l'inspection de l'enseignement agricole et portant notamment sur l'agriculture biologique, l'approche systémique ou encore l'agroécologie.

Enfin, la prise de coresponsabilité du Master AgroFoodChain et la mise en place de la nouvelle maquette depuis la rentrée 2016 a permis de fédérer l'équipe pédagogique autour de ce nouveau projet qui nécessite néanmoins d'être amélioré et renforcé dans les années à venir pour atteindre les objectifs que nous sommes fixés à savoir **proposer une formation pluridisciplinaire à l'interface entre agronomie, écologie et agronomie** pour former des professionnels capables d'analyser et de répondre aux problématiques émergentes des filières agricoles et agroalimentaires.



# CHAPITRE 2 : PRESENTATION SYNTHETIQUE DE MES ACTIVITES DE RECHERCHE

## Plan du chapitre

Résumé du chapitre	28
1. L'UMR AGIR et l'équipe VASCO	29
1.1. L'UMR AGIR	29
1.2. L'équipe VASCO	29
2. L'historique de mes recherches	29
2.1. Contexte et objectifs	30
2.2. L'étude du fonctionnement et des performances pour commencer	31
2.3. De l'étude du fonctionnement et des performances vers la conception d'itinéraires techniques	32
2.3.1. Renforcement des connaissances	32
2.3.2. Evaluation en condition agricole	32
2.3.3. Pris en compte des interactions génotype-environnement-conduite	33
2.3.4. Intégration des facteurs biotiques	33
2.4. De la conception d'itinéraires techniques vers la conception de systèmes de culture	33
2.5. De la conception de systèmes de culture vers des filières durables	34
2.5.1. La logistique des coopératives	34
2.5.2. La transformation des produits	35
2.6. Vers des approches multi-acteurs, pluridisciplinaires et multi-échelles	35
2.6.1. Développer les légumineuses à l'échelle des territoires	36
2.6.2. Travailler de concert avec Qualisol pour développer la lentille associée	36
2.6.3. Des plateformes multi-acteurs	37
3. Encadrement de personnels, stagiaires et doctorants et autres comités	37
3.1. Encadrement de personnels ENSFEA	37
3.2. Encadrement de stages	38
3.3. Comités scientifiques et jury	39
3.3.1. Comités de thèse	39
3.3.2. Jury de thèse	39
3.3.3. Comités scientifiques	39
3.3.4. Expertise et groupes de travail	39
4. Communications scientifiques	40
5. Analyse de mon expérience	40

### Résumé du chapitre

Mes travaux de recherche au sein de l'équipe VASCO de l'UMR INRA-INPT/ENSAT 1248 AGIR ont porté principalement sur **l'analyse des performances (agronomiques, économiques et environnementales) et du fonctionnement des cultures associées céréale-légumineuse à graines** à travers l'étude, entre autres, des effets de la disponibilité en azote, des variétés et des densités de semis.

Nos recherches ont confirmé **l'intérêt des associations pour améliorer la production globale ainsi que la qualité des grains de la céréale** dans les situations à faible disponibilité en azote du fait de la complémentarité interspécifique pour l'utilisation des ressources du milieu, notamment l'azote et la lumière. Ces recherches ont permis **d'identifier des pistes pour la conception d'itinéraires techniques adaptés à différents objectifs** de production.

Des travaux ont également été menés pour **étudier la logistique des coopératives** grâce à la collaboration avec deux collègues économistes de l'UMR AGIR (P. Triboulet et M.-B. Magrini) visant à **analyser les facteurs de verrouillage à la diffusion de cette pratique**. Plus largement, mes travaux **participent à la conception de systèmes de culture innovants** en collaboration avec les acteurs du monde agricole afin de faciliter le transfert de connaissances entre la recherche et le terrain à travers notamment les projets ANR MicMac Design et DurDur.

En terme de valorisation, j'ai publié **14 articles dans des revues avec comité de lecture** dont cinq en premier auteur. Deux articles sont actuellement en révision et sept sont en cours de rédaction et proches d'être soumis. J'ai aussi publié **cinq chapitres d'ouvrage** dont trois en premier auteur ainsi que **12 articles dans des revues avec comité de lecture non référencées** et 11 articles dans des revues techniques. Enfin j'ai réalisé **39 communications orales et 19 posters dans des congrès** nationaux et internationaux.

Mes travaux de recherche m'ont permis **d'acquérir des compétences en agronomie systémique** ainsi que sur la conception de protocoles, le traitement et l'analyse de données et la valorisation (articles, synthèses, communications...). Le co-encadrement de la thèse de B. Kammoun puis celle de L. Viguier furent des moments importants de ma jeune carrière d'enseignant-chercheur qui m'ont permis d'acquérir de nouvelles compétences et tout particulièrement en terme de management.

### 1. L'UMR AGIR et l'équipe VASCO

Mes travaux de recherche sur les cultures associées sont conduits au sein de l'équipe VASCO (VAriétés, et Systèmes de Culture pour une production agrO-écologique) de l'UMR INRA-INPT/ENSAT 1248 AGIR (Unité Mixte de Recherche Agroécologie-Innovations-TeRritoires). **Après la présentation de ces deux entités je décrirai les travaux de recherche que j'ai menés et les projets qui les ont portés.**

#### 1.1. L'UMR AGIR

L'UMR AGIR rassemble des chercheurs et enseignant-chercheurs en sciences biotechniques (agronomie, écophysiologie, écologie, statistiques) et en sciences sociales et humaines (sciences de gestion, économie, géographie sociale, sociologie).

**Les travaux menés au sein de l'UMR AGIR contribuent à la production de connaissances, de méthodes et de dispositifs sur les processus d'adaptation des agroécosystèmes, de leurs filières et des territoires** dans lesquels ils sont insérés afin de faire face aux changements globaux. Ceci suppose de développer et d'articuler des connaissances sur les agroécosystèmes et sur les processus d'innovations techniques et organisationnels à l'œuvre dans les filières et les territoires ruraux.

De par la diversité des objets étudiés, les chercheurs de l'UMR mobilisent aussi bien **l'expérimentation en parcelle que l'enquête, la scénarisation ou les ateliers de co-conception participative**. La modélisation joue également un rôle important servant à la fois d'outil de synthèse des connaissances, d'outil de test d'hypothèses mais aussi comme objet intermédiaire pour travailler avec des acteurs. Pour traiter l'ensemble de ces questions,

l'UMR s'est structurée récemment en trois équipes dont l'équipe VASCO à laquelle je suis rattaché.

#### 1.2. L'équipe VASCO

**L'équipe VASCO a pour objectif général la conception et l'évaluation d'itinéraires techniques et de systèmes de culture innovants et durables** en mobilisant les concepts de la production intégrée, de l'agronomie systémique et de l'agroécologie. Les travaux de recherche sont réalisés à **diverses échelles** (plante, peuplement, rotation, et paysage), combinent des méthodes **d'expérimentation** (phytotron, serre, et champ) et de **modélisation** (conceptuelle et numérique) et sont réalisés sur une grande **diversité d'espèces** (blé, tournesol, maïs, sorgho, pois protéagineux, féverole, soja...).

L'équipe VASCO est **pluridisciplinaire** avec des compétences complémentaires telles que : (i) l'agronomie systémique, (ii) l'écophysiologie végétale, (iii) la phytopathologie et l'entomologie, (iv) les sciences du sol ou encore (v) la modélisation numérique. Cette interdisciplinarité développée au sein de l'équipe VASCO permet ainsi de **concevoir et d'évaluer des stratégies innovantes avec peu ou pas d'intrants** (pesticides et engrais de synthèse).

### 2. L'historique de mes recherches

Dans la partie qui suit je m'attarderai à présenter de façon synthétique : (i) **l'évolution de mes questions de recherche** et (ii) **les projets clés qui ont supportés ces travaux**. Afin d'aider le lecteur à suivre l'évolution de mes questions de recherche au cours de ces 12 années j'utiliserai la **Figure 4** comme support en l'incrémentant progressivement. Je tiens à préciser que **dans ce chapitre je ne rentrerai pas dans le détail des résultats** obtenus car ces derniers seront précisés dans les **Chapitres 3 et 4** de ce mémoire. Quant aux

## CHAPITRE 2 : PRESENTATION SYNTHETIQUE DE MES ACTIVITES DE RECHERCHE

perspectives elles seront décrites dans le **Chapitre 5** consacré à mon projet de recherche intitulé : « **Co-conception d'itinéraires techniques de cultures**

**associées pour accroître et stabiliser la production et la qualité nutritionnelle en vue de leur intégration dans les systèmes de culture et les filières** ».

### Thématiques de recherche développées de 2006 à 2018 et publications scientifiques

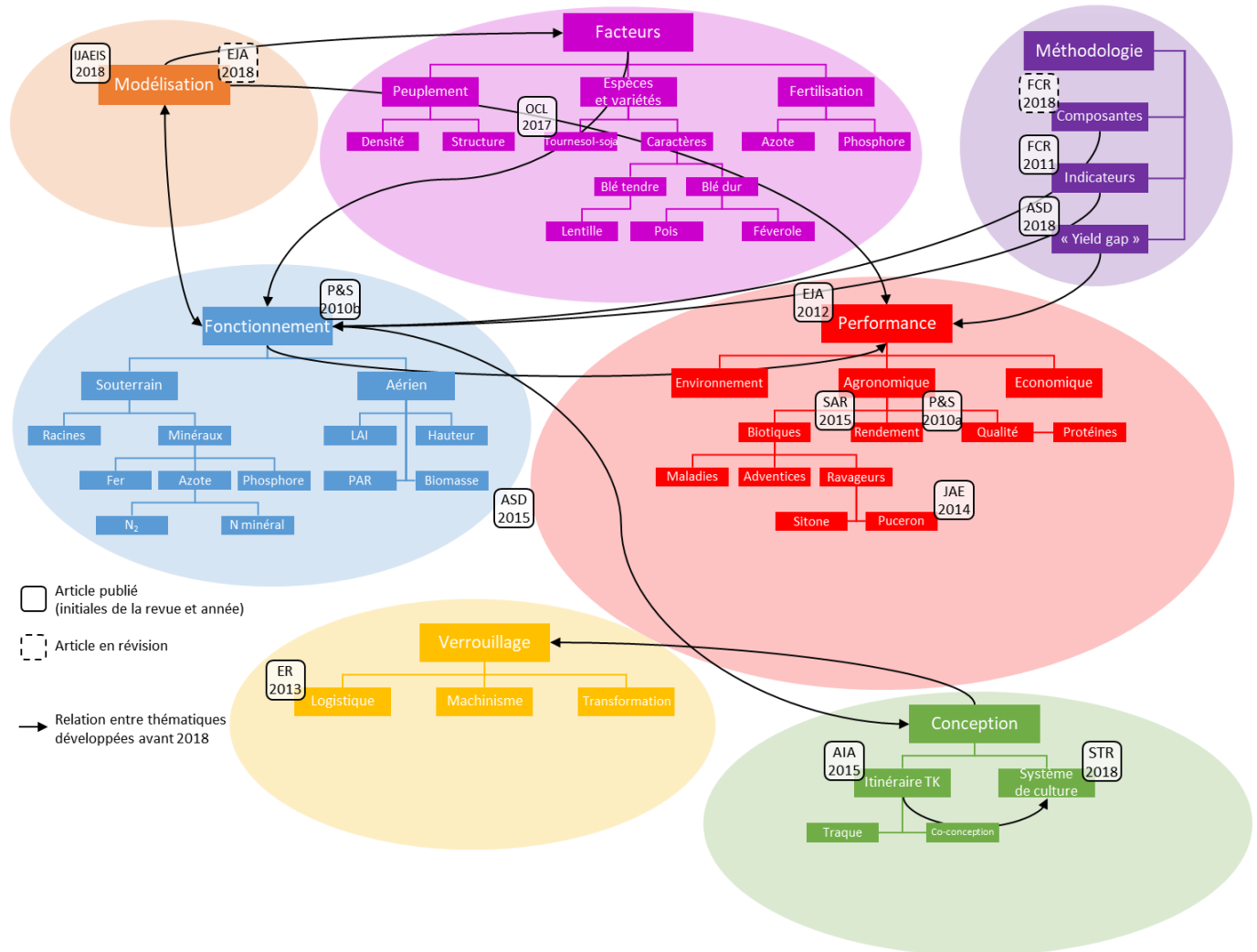


Figure 4 Représentation schématique de mes thématiques de recherche développées depuis 2006 ainsi que la liste des publications.

### 2.1. Contexte et objectifs

La diversification des systèmes de culture, via l'augmentation du nombre d'espèces cultivées, a été proposée comme l'une des solutions à un certain nombre des problèmes agricoles tels que l'érosion des sols, les pollutions par les produits phytosanitaires et les engrais mais aussi l'apparition d'agents pathogènes, insectes et adventices résistants aux traitements chimiques (Griffon 2006 ; Malézieux et al. 2009).

Cette diversification peut se faire entre autres par la culture d'associations d'espèces définies comme la culture simultanée de deux espèces ou plus sur la même surface pendant une période significative de leur croissance mais sans nécessairement être semées et récoltées en même temps (Willey 1979a).

Ces systèmes traditionnels ont été progressivement abandonnés dans les zones de grandes cultures mais connaissent un regain d'intérêt







ces associations dans une diversité de contextes pédoclimatiques suggérant **qu'il était possible a priori d'optimiser (au moins partiellement) la conduite des associations céréale-légumineuse** en fonction des objectifs de production des agriculteurs. Ainsi nous avons publié en 2015 un article de synthèse dans la revue *Agronomy for Sustainable Development* 35(3):911-935 sous le titre « **Ecological principles underlying the increase of productivity achieved by cereal-grain legume intercropping in organic farming. A review** ».

### 2.3.3. Pris en compte des interactions génotype-environnement-conduite

Les combinaisons en termes d'espèces, variétés, densités, structures de couvert ou encore disponibilités en N sont infinies et nécessitent de **définir des règles d'assemblage génériques en fonction de différents objectifs de production**.

La thèse de B. Kammoun co-encadrée par E.-P. Journet et moi-même intitulée : « **Analyse des interactions génotype x environnement x conduite culturale de peuplements bispécifiques de cultures associées de blé dur et de légumineuses à graines à des fins de choix variétal et d'optimisation de leurs itinéraires techniques** » avait pour objectif d'étudier l'effet de la variabilité génotypique des espèces sur les performances des cultures associées et d'analyser le comportement des cultivars vis-à-vis des interactions inter- et intraspécifiques.

Pour ce faire, deux expérimentations ont été menées en 2012 et 2013 afin de **tester plusieurs combinaisons de variétés présentant des traits phénotypiques différents** en comparant les cultures pures avec les associations. Nos résultats ont confirmé que la performance d'une espèce en association dépend de celle en culture pure mais aussi de sa compétitivité

qui elle-même dépend de traits phénotypiques. L'identification de ces traits pour comprendre l'impact du choix variétal dans le fonctionnement des associations pourra servir à la conception d'idéotypes adaptés aux associations et à la conception de règles d'assemblage génériques.

Ce travail a fait l'objet d'une publication soumise à *Field Crop Research* qui a été rejetée une première fois et doit être resoumise et intitulée : « **Evaluating the effect of cultivar diversity on competitive interactions and yield performance in durum wheat-grain legume intercropping** ».

### 2.3.4. Intégration des facteurs biotiques

Sous l'impulsion d'E.-P. Journet (CNRS), nous avons entrepris **des travaux de recherche sur l'étude des interactions entre cultures associées et bioagresseurs**. En particulier, nous avons publié en 2014 un article en collaboration avec nos collègues de l'UMR EDB de l'ENSFEA portant sur l'effet des cultures associées pour réduire les populations de pucerons verts du pois protéagineux : **Ndzana R. A., Magro A., Bedoussac L., Justes E., Journet E.-P., Hemptinne J.-L. (2014). Is there an associational resistance of winter pea-durum wheat intercropping towards *Acyrtosiphon pisum* Harris? *Journal of Applied Entomology* 138(8) 577:585 (Encadré 1).**

### 2.4. De la conception d'itinéraires techniques vers la conception de systèmes de culture

Après avoir travaillé à la conception de prototypes d'itinéraires techniques nous nous sommes intéressés à l'intégration des cultures associées dans les systèmes de culture (**Figure 7**).

Ces travaux ont été portés essentiellement par le projet ANR MicMac Design (Conception et évaluation par expérimentation et modélisation de prototypes de



basées sur des systèmes pluri-spécifiques ou pluri-génotypiques pour améliorer l'efficacité de l'utilisation du N et du P dans les agrosystèmes par la mise en place d'une approche inter- et pluridisciplinaire, en considérant différentes échelles et en favorisant le transfert de connaissances entre chercheurs et acteurs de la filière.

Avec M.-B. Magrini et P. Triboulet, deux économistes de l'UMR AGIR, nous avons encadré un projet tuteuré d'étudiants de l'ENSAT qui visait à **décrire la logistique des coopératives du sud-ouest de France** collectant du blé dur. Ce travail a donné lieu à la rédaction d'un article scientifique publié en 2013 dans la revue *Economie Rurale* : « **Pratiques agricoles innovantes et logistique des coopératives agricoles : Une étude ex-ante sur l'acceptabilité de cultures associées blé dur-légumineuses** » (Encadré 3).

Dans le cadre du projet PerfCom nous avons également mis en place des essais expérimentaux factoriels visant à **évaluer l'effet du phosphore sur des cultures associées** (2009 et 2011) en utilisant un essai longue durée présent sur le site de l'INRA à Auzeville et dont les résultats sont en cours de valorisation.

### 2.5.2. La transformation des produits

Le projet ANR DurDur (Innovations agronomiques, techniques et organisationnelles pour accroître la DURabilité de la filière blé DUR) piloté par B. Cuq (UMR 1208 IAT, INRA) de 2014-2017 avait pour objectif **d'aborder la problématique associée à la question azote-protéines-énergie du blé dur pour garantir une qualité des produits finis**.

Pour atteindre ces objectifs ce projet s'appuyait sur les savoir-faire, compétences, moyens techniques, expertise et complémentarité des **partenaires**

**scientifiques, techniques et professionnels de l'ensemble de la filière à travers une approche systémique** intégrant quatre niveaux d'investigation : (i) **agronomie** pour la production de grains de qualité par des itinéraires techniques innovants visant à diminuer la dépendance vis à vis des intrants, (ii) **technologie** avec l'adaptation des procédés aux teneurs et compositions en protéines des blés, (iii) **génie des procédés** pour la re-conception énergétique des équipements et (iv) **économie** pour caractériser les stratégies d'innovation et analyser les comportements des acteurs de la filière en lien avec sa durabilité.

Dans ce projet **j'ai participé à la tâche 1 coordonnée par E. Justes portant sur la conception d'itinéraires techniques innovants** visant à diminuer la dépendance du blé dur vis à vis des intrants (engrais azotés et produits phytosanitaires) en lien notamment avec le lycée d'Aix Valabre. Les différents lots de blé produits au cours des deux années de campagne ont ensuite été transformés en semoule puis en pâte par des collègues de l'UMR IAT allant jusqu'à la réalisation de test organoleptiques et à l'évaluation de la qualité sanitaire des produits (résidus de pesticides, présence de mycotoxines).

Ces travaux font actuellement l'objet de la rédaction d'un article scientifique co-écrit par Bedoussac L, Hily Y., Joubert M., Lullien-Pellerin V., Morel M.-H., Justes E. et portant le titre provisoire suivant : « **Producing qualitative and quantitative pasta with low-input innovative durum wheat crop management: yes we can** ».

### 2.6. Vers des approches multi-acteurs, pluridisciplinaires et multi-échelles

Comme nous venons de le voir mes travaux de recherche ont évolué au cours de ces 12 années de recherche allant de l'analyse du fonctionnement et de



concret de stratégie contribuant à lever certains verrous à la pratique des cultures associées par les agriculteurs.

Fort de cette collaboration et de cette dynamique la coopérative Qualisol a accepté de financer la thèse CIFRE de L. Viguier co-encadrée par E. Justes, E.-P. Journet et moi-même avec pour objectifs **d'évaluer le potentiel agronomique des cultures associées pour la production de lentille.**

Deux années d'expérimentations ont été menées sur le couple blé-lentille avec différentes variétés, densités et structures de peuplement visant :

- **Pour l'équipe de recherche VASCO** à explorer de nouveaux types d'assemblages de couverts bispécifiques céréale-légumineuse en utilisant la lentille dont la phénologie et les architectures aérienne et racinaire se distinguent du pois et de la féverole permettant ainsi d'acquérir des données et d'accroître la généricité de notre compréhension du fonctionnement des associations.
- **Pour la coopérative Qualisol** à évaluer le potentiel des associations lentille-céréale de printemps en agriculture biologique pour résoudre les problèmes agronomiques rencontrés en culture mono-spécifique (verse, enherbement et bruches) et ainsi pouvoir proposer des itinéraires techniques aux adhérents afin d'accroître la production.

La thèse de L. Viguier a été soutenue en juillet 2018 et un premier article a été publié en 2018 dans *Agronomy for Sustainable Development* sous le titre : « **Yield gap analysis extended to marketable yield reveals agronomic and economic performances of organic lentil-spring wheat intercrops** » (Encadré 2).

### 2.6.3. Des plateformes multi-acteurs

Débuté en mai 2017 pour une durée de quatre ans, le projet européen H2020 ReMIX coordonné par Éric Justes a pour objectif de **valoriser les services rendus par les cultures associées pour concevoir des systèmes plus diversifiés, plus résilients, moins dépendants des intrants, plus respectueux de l'environnement et acceptables par les acteurs des filières agricoles.** Pour ce faire, une approche de **co-conception multi-acteurs est développée et sera mise en œuvre pour initier une dynamique collective d'innovation.**

Me concernant je suis en charge de la **coordination de la Plateforme multi-acteurs du Sud-Ouest de la France** qui est l'une des 11 plateformes du projet qui sont réparties dans toute l'Europe. Ces 11 plateformes devant constituer des sites privilégiés de démonstration ouvertes aux agriculteurs lors de journées dédiées je coordonne la réalisation d'ateliers de co-conception d'itinéraires techniques, leur mise en place chez les agriculteurs. **Je coordonne également la réalisation de tests de récolte et de tri en collaboration avec des acteurs du machinisme agricole** à savoir AGCO pour la récolte et les Etablissements Denis pour le tri.

## 3. Encadrement de personnels, stagiaires et doctorants et autres comités

### 3.1. Encadrement de personnels ENSFEA

Dans le cadre d'une **réflexion menée à l'ENSFEA sur le développement des activités de recherche en agronomie**, il m'a été demandé d'impliquer du personnel ENSFEA dans mes travaux de recherche et cela afin de renforcer les collaborations avec l'UMR AGIR. J'ai ainsi proposé un **travail méthodologique conduit par M.-P. Monteil (ingénieur d'étude ENSFEA) sur l'analyse proche**

**infrarouge** en collaboration avec P. Burger, P. Petibon, E. Justes et moi-même. Ce travail consistait dans un premier temps à réaliser les fiches de protocole AQR (Assurance, Qualité, Recherche) concernant l'utilisation de l'analyseur proche infrarouge. Dans un second temps il s'agissait de développer une méthodologie de calibration pour déterminer la teneur en azote du pois protéagineux en fonction du stade physiologique, de la variété et de l'année. Cette collaboration s'est achevée plus rapidement que prévu en raison du décès brutal de notre collègue P. Petibon qui gérait l'utilisation et la maintenance de l'appareil en lien avec M.-P. Monteil et d'autre part car nous avions sous-estimé les compétences nécessaires pour conduire ce travail méthodologique.

Après cette expérience, j'ai engagé une nouvelle collaboration, cette fois avec A. Navarre (technicienne ENSFEA) avec l'appui d'E.-P. Journet, E. Justes. Ce travail visait à mettre en œuvre **un travail méthodologique pour estimer par expérimentation la discrimination isotopique du  $^{15}\text{N}$  chez différentes légumineuses ( $\beta_{\text{fix}}$ )**. Pour cela, nous allons mis en place deux expérimentations successives en serre, l'une pour estimer la discrimination isotopique de l'azote en dynamique sur pois et féverole dans le cadre de la thèse de B. Kammoun et l'année suivante pour différentes légumineuses utilisées comme cultures intermédiaires dans la thèse d'H. Tribouillois. Comme précédemment

cette collaboration s'est achevée plus rapidement que prévu suite au développement de réactions allergiques aux légumineuses de la part d'Aurélien Navarre.

### 3.2. Encadrement de stages

Au cours de ces dernières années j'ai participé à l'encadrement de stages le plus souvent de niveau Master/ingénieur en lien avec mes travaux de recherche et les expérimentations mises en place sur les cultures associées (**1 stage L3, 2 stages M1 et 7 stages M2**). Ainsi ces stages ont abordé aussi bien l'analyse du **fonctionnement et de la performance des cultures associées en termes de rendement et de qualité** des graines que des questions plus précises comme l'étude de **l'effet de la structure du couvert en interaction avec la disponibilité en azote et les bioagresseurs**. Par ailleurs, à l'interface entre recherche et enseignement j'ai co-encadré deux stages de M2 du Master EnFA dans le cadre du RMT Modélia<sup>3</sup> ainsi que le mémoire de recherche d'une enseignante stagiaire du Master 2 MEEF autour des **représentations de la notion d'agroécologie par le corps enseignant**.

Je tiens à souligner que pour favoriser l'autonomie, la prise d'initiative et l'acquisition de responsabilité par les stagiaires je fais en sorte qu'ils aient la responsabilité d'une partie du protocole que je choisis en fonction de leurs compétences et de la thématique du stage. Toutefois, chaque stagiaire doit

---

<sup>3</sup> Le RMT Modélia (Réseau Mixte Technologique Modélisation et logiciels d'intérêt commun appliqués à l'agriculture) coordonné par F. Brun (ACTA-INRA) a pour objectif de favoriser des échanges sur la modélisation de systèmes dynamiques pour le développement agricole. J'ai pris part à ce RMT en 2011 en proposant de réfléchir à la place de la modélisation dans l'enseignement à travers deux aspects : (i) la modélisation pour l'enseignement i.e. l'utilisation de modèles en tant qu'outils pédagogiques permettant de faire de l'expérimentation virtuelle pour aider à enseigner des principes agronomiques et (ii) l'enseignement de la modélisation i.e. la présentation du développement, de la création et de l'utilisation de modèles pour sensibiliser les enseignants aux intérêts pour l'enseignement.

Dans le cadre de ce RMT j'ai co-encadré avec F. Brun et des collègues de l'ENSFEA (Y. Abernot et J. Simonneaux) deux stages successifs de M2 du master en sciences de l'éducation de l'ENSFEA orientés sur la modélisation pour l'enseignement qui ont permis de : (i) identifier et analyser les ressources pédagogiques existantes mobilisant des modèles, (ii) évaluer par le biais d'une enquête de terrain les freins et les leviers à l'utilisation de la modélisation par les enseignants, (iii) concevoir une ressource pédagogique (manuel et TD) utilisant un logiciel de modélisation et (iv) tester cette ressource auprès d'enseignants du lycée agricole d'Auzeville afin de recueillir des besoins de formation ou des améliorations à apporter au logiciel et à la ressource pédagogique.

participer aux différentes étapes du protocole même si celles-ci ne concernent pas directement leur stage.

### 3.3. Comités scientifiques et jury

#### 3.3.1. Comités de thèse

Je participe actuellement à deux comités de pilotage de thèses à savoir celle de : (i) **L. Faverjon** intitulée « **Développement d'une approche de modélisation pour simuler la dynamique de communautés prairiales à base de légumineuses** » co-encadrée par Gaëtan Louarn (INRA Lusignan) et Abraham Escobar-Guttiérrez (INRA Lusignan) et (ii) **A.-F. Monnet** intitulée « **Optimisation de la transformation de matières premières issues de cultures associées légumineuse-blé tendre par une bonne connaissance de la physico-chimie des ingrédients et du procédé de fabrication** » co-encadrée par Camille Michon (UMR GENIAL) et Marie-Hélène Jeuffroy (UMR Agronomie).

#### 3.3.2. Jury de thèse

J'ai été **examineur de la thèse d'Elisa Delecourt** défendue en 2018 qui était encadrée par Alexandre Joannon et Jean-Marc Meynard (Rennes) et qui traitait de la : « **Prise en compte du travail dans les changements de pratiques vers l'agroécologie : outils et informations pour l'accompagnement des agriculteurs** ».

#### 3.3.3. Comités scientifiques

J'ai participé à différents comités scientifiques et d'organisation pour des colloques nationaux à savoir :

- **Comité de pilotage des rencontres participatives Légumineuses Grand Sud** organisées les 28 et 29 septembre 2016, en région Languedoc-Roussillon Midi-Pyrénées, par l'Académie d'Agriculture de France et les pôles

scientifiques régionaux : Agropolis International et Toulouse AgriCampus

- **Comité scientifique du colloque « Changements et transitions : enjeux pour les éducations à l'environnement et au développement durable »** des 7, 8 et 9 novembre 2017 porté par le laboratoire GEODE, en collaboration avec le laboratoire EFTS et la Structure Fédérative de Recherche AEF
- **Comités scientifique et d'organisation du colloque « 2èmes Rencontres francophones sur les légumineuses »** coordonné par Marie-Benoit Magrini UMR AGIR qui aura lieu le 17 et 18 octobre 2018 à Toulouse.

#### 3.3.4. Expertise et groupes de travail

Je participe également à deux groupes de travail au sein de l'INRA :

- **Groupe filière INRA légumineuses** depuis 11/2016 animé par M.-B. Magrini qui vise à développer les légumineuses.
- **Groupe INRA agroéquipements-agroécologie** depuis 01/2018 animé par X. Reboud qui réfléchit à la place des agroéquipements dans les changements de l'agriculture.

J'ai enfin été sollicité pour participer au comité de pilotage du projet « **Mélanges céréale-légumineuse pour des systèmes de culture économes en intrants, dont l'AB : quelles seraient les critères variétaux pertinents à sélectionner pour la conduite en association ?** » Programme IVD 2016-2020 coordonné par Nathalie Moutier UMR IGEPP.

Enfin, j'ai contribué à la rédaction d'un document d'orientation sur la stratégie de recherche à mener dans les dix ans à venir pour favoriser le développement des légumineuses : [Project completed by Emerging ag inc.](#)



[and carried out with the aid of a grant from the International Development Research Centre \(IDRC\).](#)

#### 4. Communications scientifiques

Du point de vue de la valorisation scientifique, mes travaux de recherche ont donné lieu à la publication de diverses productions (**Figure 10**) dont **14 articles** auxquels s'ajoutent **2 articles en cours de révision** et 7 en cours de finalisation. J'ai aussi publié **5 chapitres d'ouvrage** et réalisé 39 communications orales et 19 posters dans des congrès internationaux (**Figure 11**). J'ai aussi contribué à la rédaction de **12 articles scientifiques de vulgarisation** et 11 articles publiés dans la presse agricole qui témoignent de la place importante que j'accorde à la diffusion des connaissances en dehors de la sphère scientifique.

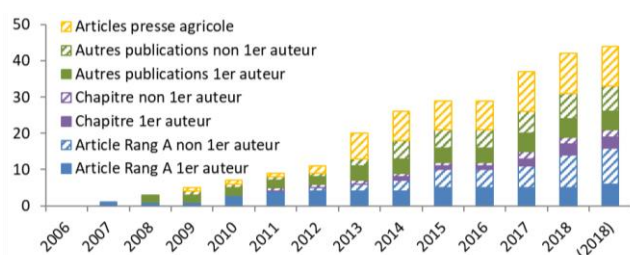


Figure 10 Nombre cumulé d'articles de rang A, de chapitres d'ouvrages, d'articles de vulgarisation et d'articles techniques publiés dans la presse agricole de 2006 à 2018.

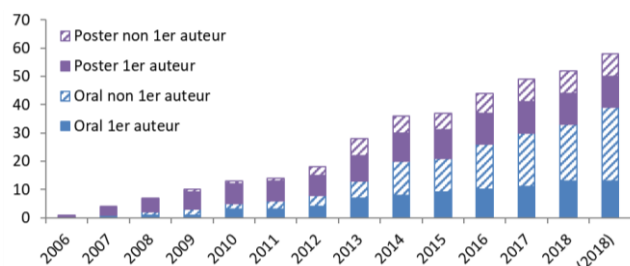


Figure 11 Nombre cumulé de communications orales et de posters en congrès de 2006 à 2018.

Toujours dans une logique de diffuser le plus largement possible mon travail **je mets à la disposition de tous l'ensemble de mes articles, posters et présentations orales sur deux plateformes** à savoir

prod'inra (<https://prodinra.inra.fr>) et researchgate ([https://www.researchgate.net/profile/Laurent\\_Bedous\\_sac/](https://www.researchgate.net/profile/Laurent_Bedous_sac/)). Pour cette même raison je réalise de nombreuses communications orales à l'échelle nationale ou régionale qui peuvent être d'ordre technique comme ce fut le cas par exemple en 2015 lors du salon Tech & Bio pour une conférence intitulée : « **Associer des espèces pour maximiser l'utilisation des ressources et réduire les bioagresseurs** » ou en 2014 dans le cadre du carrefour de l'innovation agricole organisé par l'INRA sur la thématique des cultures associées et au cours duquel j'ai contribué à trois présentations orales.

Par ailleurs, **j'accepte régulièrement d'intervenir auprès du grand public** comme par exemple à l'invitation de la mairie d'Escalquens pour une soirée débat autour du film « Un autre horizon » ou encore dans l'émission de télévision « Silence ça pousse » diffusée sur France 5 en septembre 2013. Pour moi ce travail de communication est riche d'enseignement car il s'agit de **sensibiliser un public souvent non initié aux intérêts et aux perspectives de nos travaux de recherche**. Plus largement cela contribue à créer des liens entre la recherche et la société et **nécessite de développer des stratégies didactiques particulières** que je réutilise en partie dans le cadre de mes enseignements.

#### 5. Analyse de mon expérience

**L'essentiel de mon travail de recherche s'est focalisé jusqu'à présent sur l'analyse du fonctionnement et de la performance des cultures associées.** Les nombreuses expérimentations conduites au cours des années passées nous ont permis **d'acquérir une quantité importante de données que j'ai pu capitaliser et valoriser en partie**, par le biais de la rédaction d'articles scientifiques et autres

## CHAPITRE 2 : PRESENTATION SYNTHETIQUE DE MES ACTIVITES DE RECHERCHE

communications tout au long de ces 12 années de recherche et qui devraient permettre dans les années à venir de réaliser un certain nombre d'articles dont certains sont proches d'être soumis :

- A1. Evaluating the effect of cultivar diversity on competitive interactions and yield performance in durum wheat-grain legumes intercrops.** Bedoussac L., Kammoun B., Justes E., Journet E.-P.
- A2. Recovery growth and yield of maize in intercropping depend on companion specie, co-growth duration and nitrogen supply.** Zhao J, Sun J, Che Z, Bao X, Chen W, Li W, Bedoussac L, Li L.
- A3. Evaluation multicritères de systèmes de culture diversifiés conçus pour réduire la dépendance aux intrants azotés et aux pesticides.** Bonnet C., Gaudio N., Bedoussac L., Justes E. et al.
- A4. Producing qualitative and quantitative pasta with low-input innovative durum wheat crop management: yes we can.** Bedoussac L, Hily Y., Joubert M., Lullien-Pellerin V., Morel M.-H., Justes E.
- A5. Species niche complementarity for nitrogen improves lentil-wheat intercrop grain production in organic farming.** Viguier L., Journet E.-P., Justes E, Bedoussac L.
- A6. Explaining lentil-spring wheat intercrops grain yield through yield component analysis.** Viguier L., Journet E.-P., Justes E, Bedoussac L.
- A7. Increase in grain legume yield and N<sub>2</sub> fixation with climate change and CO<sub>2</sub> enrichment in a temperate Mediterranean climate.** Falconnier G., Vermue A., Journet E.-P., Bedoussac L., Justes E.

A ces articles s'ajoutent d'autres qui ne sont encore qu'au stade de projet visant à évaluer : (i) **l'effet des densités et structures de peuplement sur le fonctionnement et la performance des cultures associées** (Bedoussac L., Justes E. et Journet E.-P.), (ii) **l'effet de la disponibilité en phosphore sur le fonctionnement et la performance des cultures associées** (Journet E.-P., Bedoussac L. et Justes E.), (iii) **l'effet des cultures associées sur les bioagresseurs** (Journet E.-P., Bedoussac L. et Justes E.) ou à proposer (iv) **une méthode de conception d'itinéraires techniques pour des associations** (Bedoussac L. et Justes E.).

Au-delà de la valorisation scientifique j'ai acquis des compétences transversales autour de la mise en place et du suivi d'expérimentations, l'encadrement d'étudiants et de personnel technique ou encore la coordination de tâches dans divers projets. En particulier, j'ai participé à l'encadrement de deux thèses, celle de B. Kammoun avec E.-P. Journet intitulée « **analyse des interactions génotype x environnement x conduite culturale de peuplements bispécifiques de cultures associées de blé dur et de légumineuses à graines à des fins de choix variétal et d'optimisation de leurs itinéraires techniques** » et celle de L. Viguier co-encadrée avec E. Justes et E.-P. Journet intitulée « **Analysis of the agronomic and economic performances of lentil-spring wheat intercrops in organic farming** ».

Les différents projets auxquels j'ai participé m'ont permis de **développer des compétences dans des thématiques qui sont au cœur des travaux menés au sein de l'UMR AGIR et de l'équipe VASCO** et je vois dans les années à venir l'occasion de renforcer la place des cultures associées dans ces derniers. En effet, **j'ai progressivement élargi mes questions de**

## CHAPITRE 2 : PRESENTATION SYNTHETIQUE DE MES ACTIVITES DE RECHERCHE

**recherche** à l'interface avec différents acteurs du monde agricole (coopératives, agriculteurs, institut techniques...) et avec différentes disciplines : (i) **l'écologie** à travers les travaux conduits avec mes collègues du laboratoire EDB sur l'étude de l'effet des cultures associées sur le puceron vert du pois et (ii)

**l'économie** grâce aux travaux réalisés avec M.-B. Magrini et P. Triboulet de l'UMR AGIR sur la question de la logistique des coopératives. L'ensemble des travaux développés depuis 2006 ainsi que la liste des publications sont rappelés dans la **Figure 12**.

### Thématiques de recherche développées de 2006 à 2018 et publications scientifiques dont celles en préparation

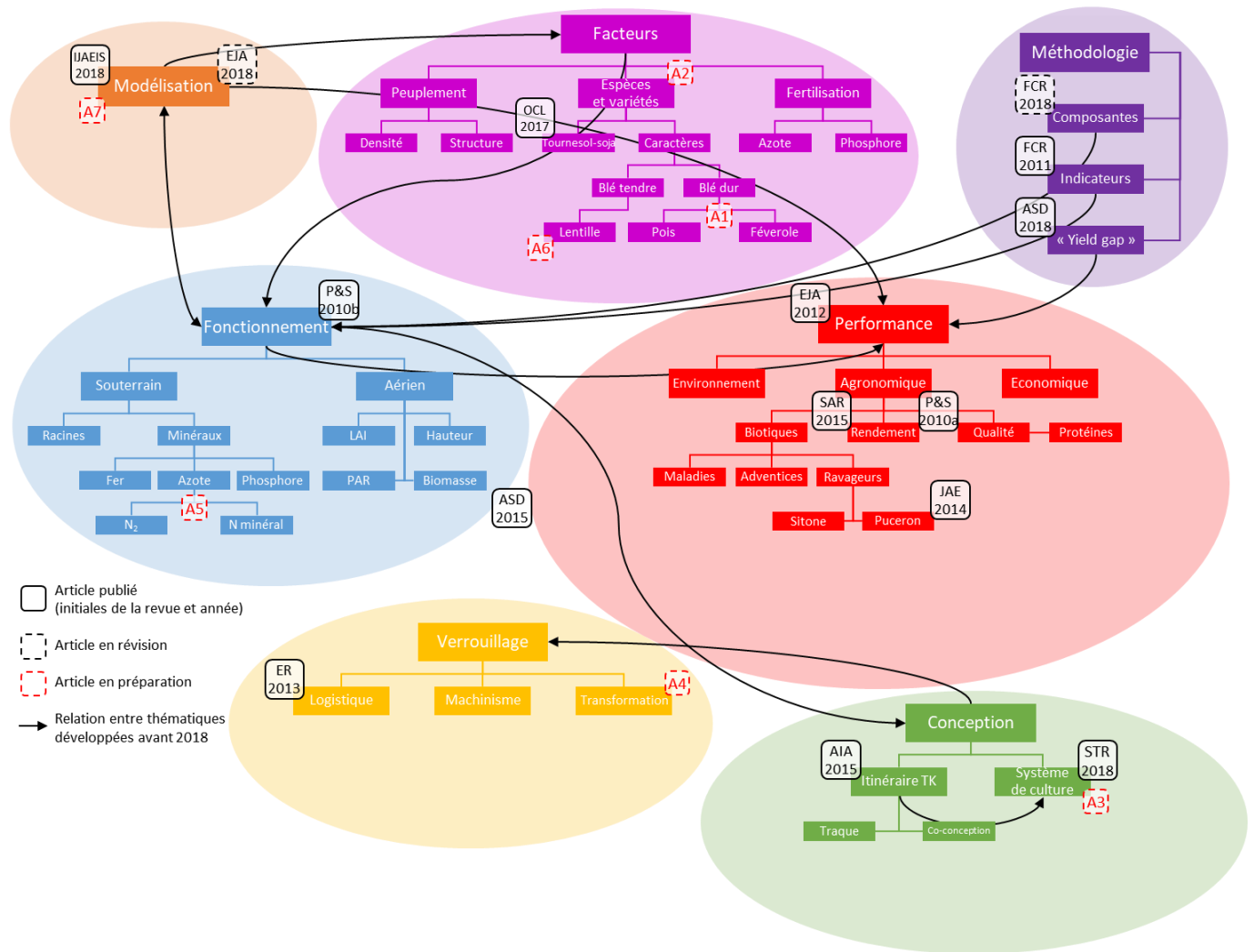


Figure 12 Représentation schématique de mes thématiques de recherche depuis 2006, des articles publiés, en révision et en préparation.

# CHAPITRE 3 : ANALYSE MULTICRITERES DES PERFORMANCES DES ASSOCIATIONS

## Plan du chapitre

Résumé du chapitre	44
Articles utilisés pour ce chapitre	44
Article principal	44
Articles servant d'illustration	44
1. Introduction générale sur les cultures associées	45
2. Amélioration des rendements	48
3. Amélioration de la teneur en protéines	49
4. Moins d'enherbement et de pucerons	50
Encadré 1 Résumé de l'article publié en 2014 dans Journal of Applied Entomology 138 577:585	52
5. Performance économique	53
Encadré 2 Résumé de l'article publié en 2018 dans Agronomy for Sustainable Development 38:39	54
Encadré 3 Résumé de l'article publié en 2013 dans Economie rurale 338:25-45	56
6. Performance environnementale	57
7. Conclusions et perspectives	57
Encadré 4 Résumé de l'article publié en 2012 dans European Journal of Agronomy 40 :39-53	58

### Résumé du chapitre

- **Les cultures associées améliorent l'utilisation des ressources abiotiques par rapport aux cultures pures** permettant :
  - **Rendement total en grains supérieur** au rendement moyen des cultures pures (0,33 vs 0,27 kg m<sup>-2</sup>)
  - **Diminution de la biomasse des adventices** par rapport aux légumineuses pures (0.04 vs 0.14 kg m<sup>-2</sup>)
  - **Teneur en protéines plus élevée dans les grains de céréales** par rapport à la culture pure (11,1 vs 9,8%)
- **Les avantages des cultures associées sont d'autant plus élevés que le rendement de l'une ou l'autre des cultures pures, ou la teneur en protéines des céréales pures, est faible.** Cela confirme l'intérêt de cette pratique dans les systèmes à faible disponibilité en azote suggérant que les cultures associées sont un levier intéressant pour accroître et stabiliser les rendements en agriculture biologique.
- **L'efficacité du tri des graines après la récolte détermine si la production peut être vendue pour l'alimentation humaine et donc à un prix plus élevé, ce qui représente le principal défi pour le développement de cette pratique** pour les organismes collecteurs-stockeurs en termes de logistique et matériel.
- **En faisant l'hypothèse que les cultures associées peuvent être triées correctement, alors leur marge brute est supérieure à celle de la moyenne des cultures pures dans 80% des situations (702 vs 577 € ha<sup>-1</sup>)** et les cultures associées apparaissent aussi comme un moyen de sécuriser la marge pour les agriculteurs en particulier dans le cas des années présentant de faibles rendements pour l'une ou l'autre des cultures pures.

### Articles utilisés pour ce chapitre

#### Article principal

- **Bedoussac L.**, Journet E.-P., Hauggaard-Nielsen H., Naudin C., Corre-Hellou G., Jensen E. S., 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(3):911-935

#### Articles servant d'illustration

- Ndzana R. A., Magro A., **Bedoussac L.**, Justes E., Journet E.-P., Hemptinne J.-L. (2014). Is there an associational resistance of winter pea - durum wheat intercropping towards *Acyrtosiphon pisum* Harris? *Journal of Applied Entomology* 138(8) 577:585
- Viguier L., **Bedoussac L.**, Journet E.-P., Justes E. (2018). Yield gap analysis extended to marketable yield reveals agronomic and economic performances of organic lentil-spring wheat intercropping *Agronomy for Sustainable Development* 38:39
- Magrini M.-B., Triboulet P., **Bedoussac L.** (2013). Pratiques agricoles innovantes et logistique des coopératives agricoles. Une étude ex-ante sur l'acceptabilité de cultures associées blé dur-légumineuses. *Economie rurale* 338:25-45
- Pelzer E., Bazot M., Makowski D., Corre-Hellou G., Naudin C., Al Rifaï M., Baranger E., **Bedoussac L.**, Biarnès V., Boucheny P., Carrouée B., Dorvillez D., Foissy D., Gaillard B., Guichard L., Mansard M.-C., Omon B., Prieur L., Yvergniaux M., Justes E., Jeuffroy M.-H. (2012). Pea-wheat intercropping in low-input conditions combine high economic performances and low environmental impacts. *European Journal of Agronomy* 40:39-53

Ce chapitre est basé pour l'essentiel sur l'article de synthèse publié en 2015 par Bedoussac L. et al. dans la revue *Agronomy for Sustainable Development* 35(3):911-935 sous le titre « **Ecological principles underlying the increase of productivity achieved by cereal-grain legume intercropping in organic farming. A review** ».

Par ailleurs j'ai choisi d'inclure dans ce chapitre de résultats des focus sur quatre articles dont les résultats n'ont pas été développés ou tout du moins partiellement dans l'article de synthèse cité précédemment : **Encadré 1** : Ndzana et al. (2014) *Journal of Applied Entomology* 138:577:585; **Encadré 2** : Viguier et al. (2018) *Agronomy for Sustainable Development* 38:39; **Encadré 3** : Magrini et al. (2013) *Economie rurale* 338:25-45 et **Encadré 4** : Pelzer et al. (2012) *European Journal of Agronomy* 40:39-53.

### 1. Introduction générale sur les cultures associées

Assurer la sécurité alimentaire d'une population mondiale qui devrait atteindre neuf milliards d'individus à l'horizon 2050 représente un défi majeur pour l'agriculture (FAO 2010) et ce d'autant plus qu'il est nécessaire d'intégrer la question de la durabilité visant à préserver la disponibilité des ressources pour les générations futures dans un contexte de changement climatique avéré (IPCC 2014).

**Accroître la diversité cultivée dans les agrosystèmes est reconnue comme un levier important du développement durable** (IAASTD 2009 ; Davies et al. 2009). Pour autant, 82 espèces fournissent à elles seules 90% de l'énergie consommée aujourd'hui par les hommes (Prescott-Allen et Prescott-Allen 1990). Restaurer une haute diversité spécifique et génétique au cours des 40

prochaines années (Pardey et Pingali 2010) sera difficile car les pratiques agricoles et les modes de consommation se sont construites autour de quelques espèces commerciales majeures dont les variétés modernes possèdent un fort potentiel de rendement par rapport à bon nombre d'espèces traditionnelles.

Dès lors, **la seule voie de la diversification ne suffira pas à elle seule à répondre aux défis que l'agriculture** devra relever demain. Il faudra qu'elle s'appuie également sur les technologies développées au cours du demi-siècle passé et en tout premier lieu le progrès génétique et l'utilisation des intrants à moins d'un changement radical dans nos habitudes alimentaires.

Cependant, l'accroissement des préoccupations sociétales sur les impacts environnementaux nécessite de **limiter autant que possible les effets indésirables liés à l'utilisation des intrants** tels que la perte de biodiversité, la consommation d'énergie fossile dont celle utilisée pour la production des engrais de synthèse contribuant au réchauffement climatique (Kim et Dale 2005). A cela s'ajoute les pollutions des sols, de l'air et de l'eau liés entre autres à l'usage excessif des produits phytosanitaires.

Cela nécessite donc une **transformation des systèmes de culture actuels pour en accroître l'efficacité et la durabilité** (Cox et Atkins 1979 ; Jackson et Piper 1989 ; Vandermeer et al. 1998 ; Griffon 2006). **L'agriculture biologique est perçue comme un prototype permettant d'accroître la durabilité des systèmes agricoles actuels** car : (i) elle n'autorise pas l'utilisation des intrants de synthèse et (ii) elle repose généralement sur une plus haute diversité cultivée que les systèmes agricoles dits conventionnels fortement spécialisés.

**L'introduction d'une plus grande proportion de légumineuses** a également été proposée comme un levier à mettre en œuvre pour faire face aux enjeux de l'agriculture pour demain (Vandermeer 1995 ; Vandermeer et al. 1998 ; Altieri 1999 ; Griffon 2006 ; Malézieux et al. 2009). Ainsi, **les systèmes agricoles de demain devront certainement être reconçus autour de la valorisation de la fixation symbiotique de l'azote** atmosphérique de l'air par les légumineuses à graines, les légumineuses fourragères ou les engrais verts (Peoples et al. 2009) plutôt que par l'utilisation massive des engrais azotés de synthèse.

En effet, l'exploitation de la fixation symbiotique des légumineuses comme une source majeure d'azote et un enjeu crucial puisque cela signifie moins d'engrais nécessaire (Fustec et al. 2010) et donc une réduction des émissions de CO<sub>2</sub> (Nieder et Benbi 2008) et *in fine* une moindre empreinte carbone des produits agricoles (Gan et al. 2011). A cela s'ajoute le fait que **les rotations centrées autour des légumineuses contribuent à fournir d'autres services écosystémiques** comme la séquestration du carbone ou la préservation de la biodiversité (Peoples et al. 2009).

**L'intérêt des légumineuses est particulièrement visible en agriculture biologique** où la disponibilité en azote est souvent limitante du fait de l'interdiction de l'usage des engrais de synthèse et du coût des engrais organiques en absence d'atelier d'élevage (David et al. 2005). Pour autant, les légumineuses restent en retrait par rapport aux autres grandes cultures et ce y compris en agriculture biologique du fait notamment de leur **réputation à produire de faibles rendements et présentant une variabilité interannuelle plus forte** en lien avec différents facteurs limitants comme leur sensibilité à la verse, leur fait de leur verse, aux attaques d'agents pathogènes

comme *Ascochyta spp.*, *Botrytis spp.* ou *Erysiphe spp.*, aux ravageurs comme *Sitona lineatus* L. ou *Acyrtosiphon pisum* Harris, et enfin de leur faible compétitivité vis à vis des adventices.

Dès lors, les cultures associées, **définies comme la croissance simultanée de deux ou plusieurs espèces dans le même champ pendant une période de temps significative (Willey 1979a) mais sans nécessairement être semées ou récoltées simultanément** (Vandermeer et al. 1998 ; Malézieux et al. 2009) pourraient être un moyen entre autres d'introduire plus de légumineuses dans les systèmes de culture que par le biais de peuplements monospécifiques (Hauggaard-Nielsen et al. 2009b).

Les associations céréale-légumineuse sont **basées sur la complémentarité fonctionnelle des espèces** et peuvent être considérées comme **une forme d'intensification éco-fonctionnelle** (Niggli et al. 2009) pour : (i) **augmenter la productivité des cultures** (Hauggaard-Nielsen et al. 2009b ; Lithourgidis et al. 2006 ; Qin et al. 2013), (ii) **stabiliser les rendements** (Hauggaard-Nielsen et al. 2009b ; Raseduzzaman et Jensen 2017), (iii) **augmenter la concentration en protéines des grains de céréale** (Gooding et al. 2007), (iv) **émettre significativement moins de gaz à effet de serre** (Oelhermann et al. 2009 ; Naudin et al. 2014) et (v) **permettre une plus grande résilience des systèmes vis-à-vis des stress biotiques** qu'il s'agisse des adventices (Banik et al. 2006 ; Corre-Hellou et al. 2011) ou des ravageurs et agents pathogènes (Trenbath 1993 ; Altieri 1999 ; Hauggaard-Nielsen et al. 2007 ; Ratnadass et al. 2012).

Cependant, en raison de l'intensification de l'agriculture au cours des 50 dernières années (Crews et Peoples 2004), **les cultures associées sont désormais rares dans les pays européens** y compris dans les

### CHAPITRE 3 : ANALYSE MULTICRITERES DES PERFORMANCES DES ASSOCIATIONS

systèmes d'élevage extensif (Anil et al. 1998 ; Malézieux et al. 2009) alors que les mélanges de graminées et de légumineuses sont la norme dans les écosystèmes herbagers non cultivés. Cependant, il semble y avoir **un regain d'intérêt pour les cultures associées céréale-légumineuse en Europe**, notamment en agriculture biologique (Anil et al. 1998 ; Malézieux et al. 2009).

L'objectif principal de ce chapitre est de **décrire et d'analyser les avantages potentiels des cultures associées céréale-légumineuse à grains en agriculture biologique** en se limitant au cas d'associations bispécifiques où les deux espèces sont semées et récoltées simultanément et en se focalisant sur : (i) le rendement en grains, (ii) la concentration en protéines de la céréale, (iii) les adventices, (iv) les pucerons et (v) la marge brute économique.

Pour cela nous nous appuyons sur des données originales provenant **d'expérimentations conduites entre 2001 et 2010 dans le sud et de l'ouest de la France et au Danemark** aussi bien en station expérimentale qu'en exploitation agricole et dans des conditions pédoclimatiques contrastées (**Figure 13**).

Ces expérimentations recouvrent **un large éventail de pratiques** en termes d'utilisation ou non de fertilisation azotée organique, de structure de semis (en rangs alternés ou en mélange sur le rang), de densités et proportions de semis et de variétés. Les céréales considérées sont l'orge (*Hordeum vulgare* L.), le blé tendre (*Triticum aestivum* L.) et le blé dur (*Triticum turgidum* L.) cultivés en association avec le pois (*Pisum sativum* L.) ou la fêverole (*Vicia faba* L.) aussi bien en cultures d'hiver que de printemps.

Ce jeu de données, associé à une importante analyse bibliographique permet **une évaluation**

#### **générique de la performance des cultures associées céréale-légumineuse à graines.**

D'un point de vue méthodologique les cultures associées ont été systématiquement comparées aux cultures pures correspondantes semés à la même date et recevant la même fertilisation azotée. Les cultures pures de légumineuses non jamais été fertilisées en faisant **l'hypothèse que l'azote ne constitue pas une ressource limitante pour ces dernières** (Sagan et al. 1993 ; Voisin et al. 2002). Toutefois, cette hypothèse peut être invalidée dans certaines conditions comme en cas de stress hydrique ou en présence de sitones causant des dommages précoces aux nodules.



Figure 13 Culture associée de blé dur-pois d'hiver (en haut) et de blé dur-fêverole d'hiver (en bas) dans le Sud de la France. Bedoussac et al. (2015).



## 2. Amélioration des rendements

Le **Land Equivalent Ratio (LER)** défini par **Willey et Osiru (1972)** est largement utilisé dans les articles traitants des cultures associées (11% des articles publiés depuis 2000 d'après ISI Web of Science 2010) pour comparer leur efficacité relativement à leurs cultures pures respectives.

Le **LER est le plus souvent utilisée pour comparer les cultures associées et les cultures en terme de rendement** mais il peut être utilisé pour d'autres variables quantitatives de production. Le LER est défini comme **la surface relative requise de cultures pures pour produire le même rendement qu'une culture associée en conservant la même proportion** entre les espèces. Plus précisément, pour une association céréale-légumineuse, le LER calculé à partir du rendement ( $LER_{Yield}$ ) est la somme des LER partiels de la céréale ( $LER_{Yield-Cereal}$ ) et de la légumineuse ( $LER_{Yield-Legume}$ ) d'après la formule :

$$LER_{Yield} = LER_{Yield-Cereal} + LER_{Yield-Legume}$$

$$= \frac{Yield_{Cereal-Intercrop}}{Yield_{Cereal-Sole\ crop}} + \frac{Yield_{Legume-Intercrop}}{Yield_{Legume-Sole\ crop}}$$

Les valeurs de LER calculées à partir du rendement en grains sont **presque systématiquement supérieures à un (1,27 en moyenne)** ce qui indique un avantage de la culture associée par rapport aux cultures pures en terme de rendement. Ce résultat s'explique notamment par une meilleure utilisation des ressources disponibles telles que la lumière, l'eau et l'azote et confirme les résultats obtenus aussi bien en agriculture conventionnelle qu'en agriculture biologique. Nos résultats montrent également une grande variabilité dans les valeurs de LER, comprises entre 0,93 et 2,41 avec 50% des observations entre 1,06 et 1,36.

Le LER est un indicateur pertinent pour quantifier la productivité du mélange par rapport aux cultures pures (Jolliffe 2000) mais du fait qu'il dépend des références choisies pour les cultures pures **les valeurs de LER doivent toujours être mise en perspective avec les valeurs de rendement absolues** (Mead et Willey 1980). En effet, les performances relatives et absolues ne sont pas nécessairement corrélées si bien que les mélanges d'espèces ayant les LER les plus élevées n'ont pas nécessairement la productivité la plus élevée (Garnier et al. 1997 ; Jolliffe et Wanjau 1999).

**Le rendement de l'association est presque toujours supérieur au rendement moyen des cultures pures** ( $0,33 \pm 0,10$  vs  $0,27 \pm 0,09$  kg m<sup>-2</sup> ; **Figure 14**) et ce pour une large gamme de rendements ( $0,06$  à  $0,57$  kg m<sup>-2</sup>). Ainsi, le rendement relatif des mélanges (RYM) – défini comme le rapport entre le rendement total de la culture associée et le rendement moyen des cultures pures (Wilson 1988) – est en moyenne de  $1,30 \pm 0,26$  avec des valeurs comprises entre 0,93 et 2,06. Le rendement total des cultures associées est supérieur dans 64% des cas à celui de la céréale pure ( $0,29 \pm 0,09$  kg m<sup>-2</sup> ; **Figure 14**) et supérieur dans 83% des cas à la légumineuse seule ( $0,24 \pm 0,14$  kg m<sup>-2</sup> ; **Figure 14**).

**De plus, l'avantage des cultures associées semble être plus important lorsque le rendement de l'une ou l'autre des cultures pures est assez faible**, ce qui suggère que la culture associée pourrait être un moyen pour accroître et stabiliser les rendements en agriculture biologique et dans les systèmes limitants en azote. Ces résultats confirment ceux obtenus en agriculture conventionnelle et en agriculture biologique en particulier pour les mélanges céréale-légumineuse (Jensen 1996a ; Bedoussac et Justes 2010ab ; Hauggaard-Nielsen et al. 2009ab).

3. Amélioration de la teneur en protéines

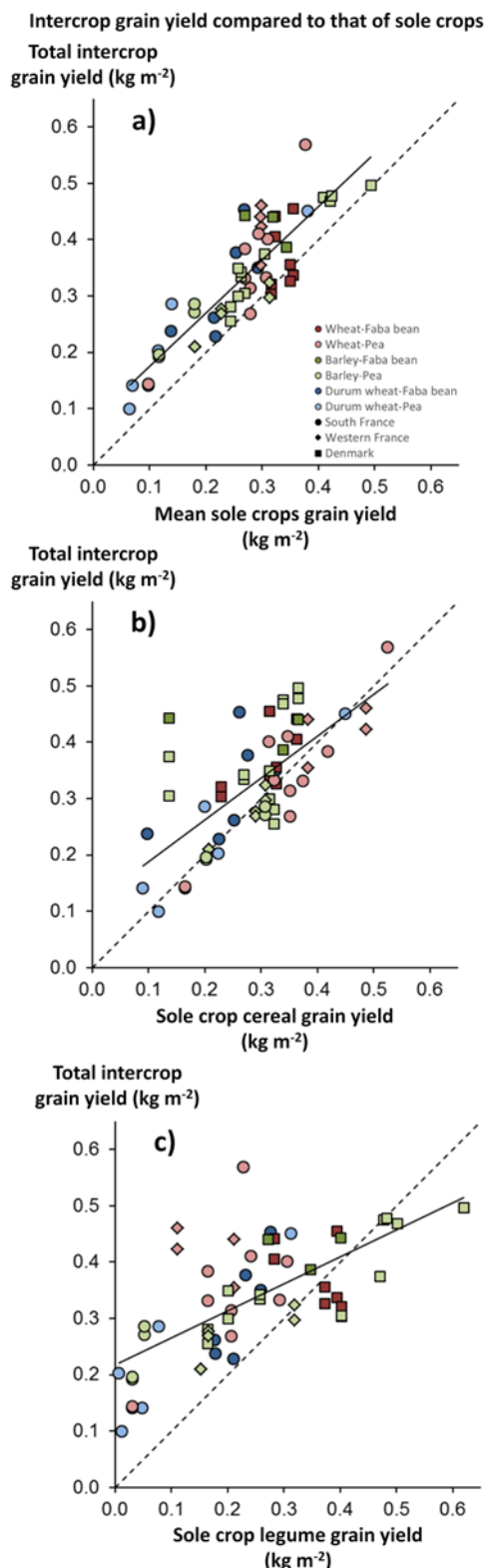


Figure 14 Rendement total (kg m<sup>-2</sup>) de la culture associée (céréale + légumineuse) en fonction a) du rendement moyen des cultures pures ( $y = 0.95x + 0.08$ ;  $R^2 = 0.74$  \*\*\*), b) du rendement de la céréale pure ( $y = 0.74x + 0.11$ ;  $R^2 = 0.48$  \*\*\*) et c) du rendement de la légumineuse pure ( $y = 0.48x + 0.22$ ;  $R^2 = 0.44$  \*\*\*). N = 58. Bedoussac et al. (2015).

Satisfaire les besoins en azote des céréales est cruciale pour obtenir un rendement et une concentration en protéines satisfaisants (Garrido-Lestache et al. 2004). Par conséquent, les céréales sont généralement fertilisées avec des niveaux élevés d'azote dans les systèmes de culture conventionnels, mais aussi dans les systèmes biologiques. A l'inverse, dans les systèmes à bas niveau d'azote où ce dernier est limitant il est difficile d'atteindre les concentrations en protéines requises par les industries agroalimentaires pour faire du pain (blé tendre) ou de la semoule et des pâtes alimentaires (blé dur).

De plus pour le blé dur il est aussi nécessaire d'augmenter les quantités d'azote remobilisé dans le grain pendant la dernière partie du cycle de culture afin d'éviter la formation de grains mitadinés (Garrido-Lestache et al. 2004) qui diminuent sensiblement le rendement semoulier puisque seules les parties vitreuses des grains sont utilisées pour la production de semoule de qualité (Samaan et al. 2006).

Nos résultats confirment que la concentration en protéines des grains des céréales associées est presque toujours supérieure à celle de leur culture pure respective (11,1% vs 9,8% ; Figure 15) comme l'on également montré divers travaux (Jensen 1996a ; Knudsen et al. 2004 ; Bedoussac et Justes 2010a ; Naudin et al. 2010).

L'avantage de la culture associée est surtout visible lorsque la concentration en protéines de la céréale seule est faible ce qui correspond à des situations où l'azote disponible est limitant. Cela confirme les avantages des cultures associées dans ces conditions (Bedoussac et Justes 2010a, Figure 15). D'ailleurs, comme l'ont montré Naudin et al. (2010),

### CHAPITRE 3 : ANALYSE MULTICRITERES DES PERFORMANCES DES ASSOCIATIONS

les cultures associées de blé-pois d'hiver non fertilisées peuvent produire des concentrations en protéines dans les grains de blé similaires à celles obtenues avec des blés purs fertilisés avec 18,5 g de N m<sup>-2</sup>.

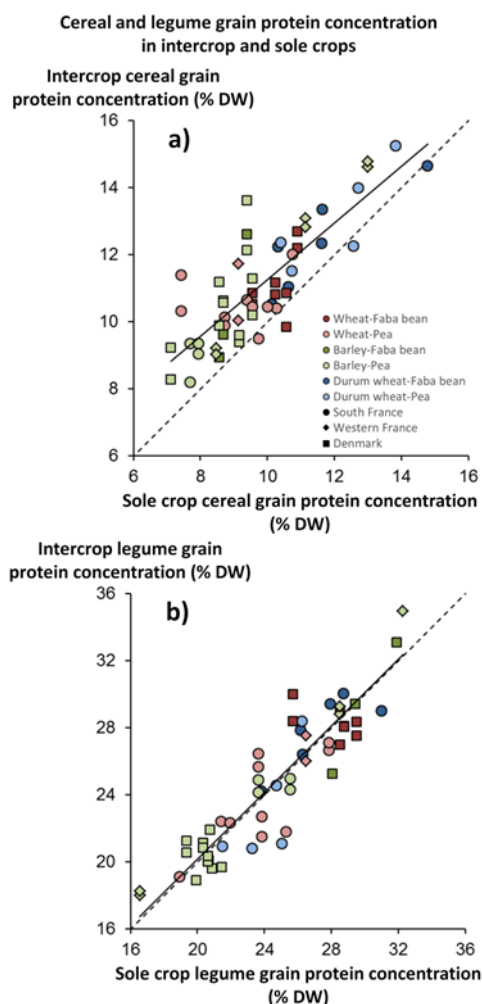


Figure 15 Concentration en protéines dans les grains (en % du poids sec) dans les cultures associées en fonction de celle en culture pure pour (a) la céréale ( $y = 0,85 \cdot x + 2,77$ ;  $R^2 = 0,69^{***}$ ) et (b) la légumineuse ( $y = 0,99 \cdot x + 0,28$ ;  $R^2 = 0,84^{***}$ ). La concentration en protéines céréalières a été calculée en multipliant la teneur en azote par 6,25 pour la légumineuse et l'orge (consommation animale) et par 5,7 pour le blé (consommation humaine). N = 58. Bedoussac et al. (2015).

Dans le cas des légumineuses (Figure 15), aucune différence dans la concentration en protéines des grains n'a pu être observée entre les cultures pures et les cultures associées (24,9% dans les deux cas). Ce résultat s'explique certainement par la capacité des

légumineuses à satisfaire leurs besoins azotés par la fixation symbiotique du N<sub>2</sub> atmosphérique ou par le fait que la baisse de rendement de ces dernières se traduit par une diminution proportionnelle de la quantité d'azote acquise et ensuite remobilisée dans les grains.

#### 4. Moins d'enherbement et de pucerons

Les associations pourraient réduire les adventices qui, en utilisant une partie des ressources disponibles, limitent le rendement des cultures et notamment celui des légumineuses connues pour être de faible compétiteurs en culture pure (Wall et al. 1991 ; Townley-Smith et Wright 1994 ; McDonald 2003).

Nos résultats montrent que la biomasse des adventices en culture associée est significativement inférieure à celle observée dans les cultures pures de légumineuses (0,04 kg m<sup>-2</sup> vs 0,14 kg m<sup>-2</sup>) et comparable à celle des cultures pures de céréale (0,04 kg m<sup>-2</sup>, Figure 16). Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus par Corre-Hellou et al. (2011) dans des cultures associées pois-orge où la suppression des adventices était élevée même avec un faible pourcentage d'orge dans la biomasse totale.

Nos résultats confirment que la culture associée maintient une compétition hautement asymétrique sur les adventices, quelles que soient les espèces, la pression d'adventices, la biomasse produite ou la disponibilité en azote du sol. Ces relations doivent être étudiées plus en détail notamment afin d'analyser si cet effet dépend des espèces d'adventices.

Cette réduction des adventices en culture associée peut s'expliquer par la complémentarité entre les espèces associées pour : (i) l'utilisation de l'azote (azote minéral du sol et N<sub>2</sub> atmosphérique), (ii) la capture de l'énergie lumineuse (par exemple Bedoussac et Justes 2010b) et (iii) la couverture du sol

### CHAPITRE 3 : ANALYSE MULTICRITERES DES PERFORMANCES DES ASSOCIATIONS

(Figure 17, Anil et al. 1998) qui laisse *in fine* moins d'espace, d'eau et de nutriments disponibles aux adventices. Il est important de garder à l'esprit que **la céréale associée est un élément précieux pour améliorer la compétitivité envers les adventices** et également en fournissant à la légumineuse un support physique pour réduire sa verse et son enherbement.

Weeds dry weight at harvest in intercrop and sole crops

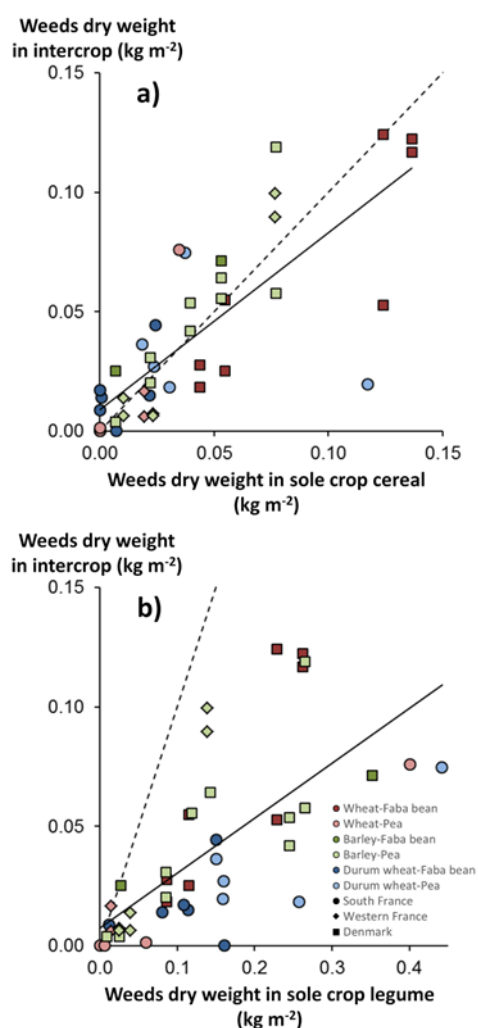


Figure 16 Biomasse des adventices à la récolte ( $\text{kg m}^{-2}$ ) dans la culture associée en fonction de (a) la céréale pure ( $y = 0.86*x$ ;  $R^2 = 0.59$  \*\*\*) et (b) de la légumineuse pure ( $y = 0.26*x$ ;  $R^2 = 0.47$  \*\*).  $N = 43$ . Bedoussac et al. (2015).

De plus, **même si les cultures associées permettent de lutter efficacement contre les adventices, elles peuvent néanmoins nécessiter un**

**désherbage mécanique** dans le cas d'une infestation importante ou pour prévenir l'augmentation du stock semencier dans le sol. En agriculture biologique, la herse étrille et le binage sont des outils régulièrement utilisés qui peuvent s'avérer efficace lorsque l'opération est correctement programmée. Cependant, dans les cultures associées **les stades optimaux des deux espèces pour réaliser un désherbage mécanique peuvent être incompatibles** et par conséquent les périodes propices peuvent être réduites et plus difficiles à programmer. Cette technique doit donc être appliquée avec plus de soin et nécessite certainement plus de technicité qu'en cultures pures.

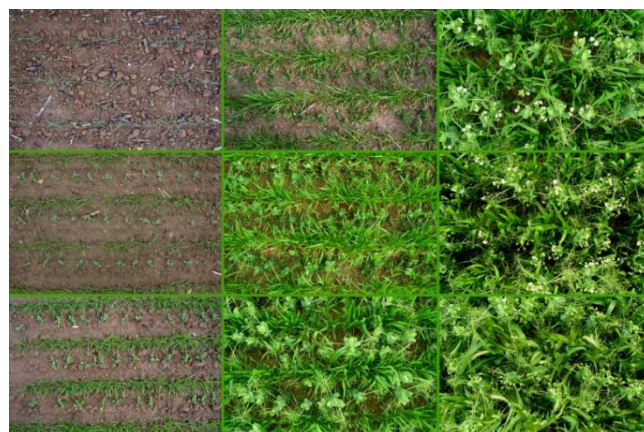


Figure 17 Dynamique de la couverture du sol par l'association blé dur-poïs d'hiver. Bedoussac et al. (2015)

Les associations peuvent aussi potentiellement réduire les agents pathogènes et les ravageurs qui sont aussi des facteurs limitants de la productions agricole (Liebman 1988 ; Liebman et Dyck 1993 ; Midmore 1993 ; Liebman et Davis 2000 ; Hauggaard-Nielsen et al. 2001b ; Trenbath 1993 ; Altieri 1999). Dans le cadre de nos travaux nous avons réalisé **une étude visant à évaluer l'efficacité des cultures associées blé dur-poïs pour réduire le puceron vert (*Acyrtosiphon pisum* Harris)** qui a été publiée en 2014 dans Journal of Applied Entomology 138(8) 577:585 en partenariat avec des collègues de l'UMR EDB (**Encadré 1**).

Encadré 1 Résumé de l'article publié en 2014 dans Journal of Applied Entomology 138(8) 577:585 visant à évaluer la capacité des cultures associées blé dur-pois d'hiver à réduire la présence du puceron vert du pois (*Acyrtosiphon pisum* Harris).



## Is there an associational resistance of winter pea- durum wheat intercrops towards *Acyrtosiphon pisum* Harris?

R.A. Ndzana, A. Magro, L. Bedoussac, E. Justes, E.-P. Journet, J.-L. Hemptinne

*Acyrtosiphon pisum* Harris (Aphididae: Hemiptera), le puceron du pois, est un ravageur important en agriculture biologique. Dans ce travail, l'objectif était de recueillir des données de terrain pour évaluer la capacité des cultures associées de blé dur-pois d'hiver à réduire le puceron du pois, comparativement aux peuplements purs de pois d'hiver. Nos résultats ont montré que la **culture associée diminuait significativement l'abondance de *A. pisum*** dans toutes les situations (**Figure 18**). De plus, on a observé que la biomasse par plante de pois était systématiquement supérieure dans les peuplements purs que dans les associations, mais après avoir considéré la masse sèche des plantes de pois comme covariable, l'association apparaît comme encore moins attaquée par les pucerons que la culture pure. Les cultures associées ont eu une incidence sur les niveaux d'infestation et **les systèmes substitutifs apparaissent comme plus efficaces que les systèmes additifs** avec une pleine densité de pois pour réduire le niveau d'infestation par les pucerons. En outre, **l'association substitutive en rang est significativement moins infestée** que le mélange substitutif en mélange sur le rang. Ces résultats suggèrent que **l'hypothèse de concentration des ressources pourrait expliquer la capacité de l'association blé dur-pois d'hiver à réduire la présence de *A. pisum*** comparativement aux cultures pures de pois.

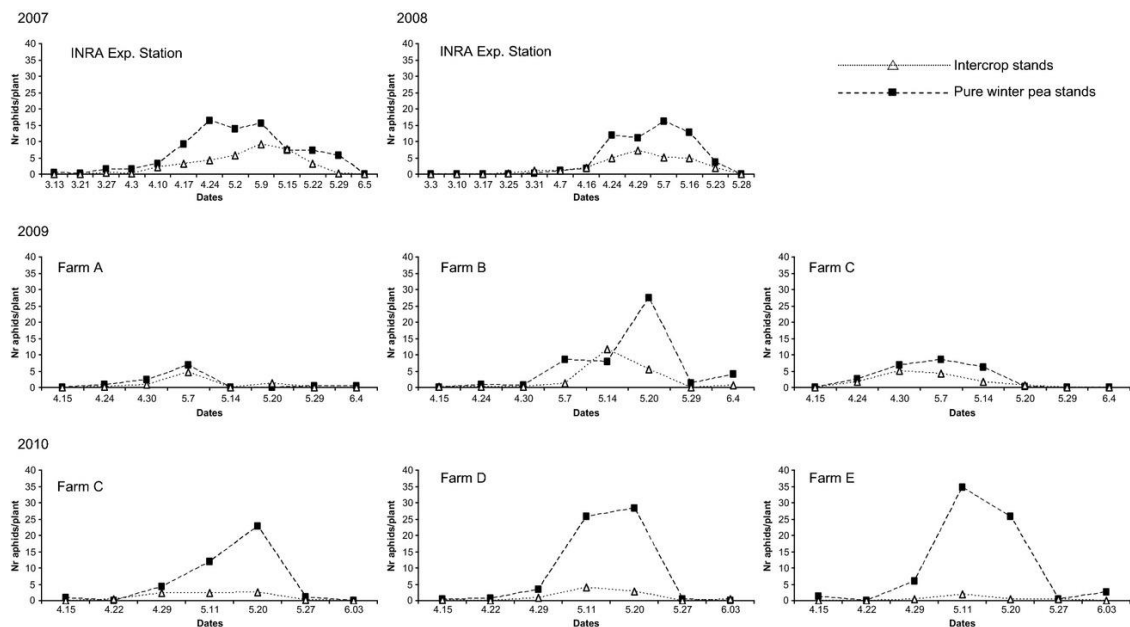


Figure 18 Evolution du nombre de pucerons par plante de pois d'hiver en culture pure et en association avec le blé dur.

## 5. Performance économique

Les agriculteurs sont de plus en plus sujets aux fluctuations des prix des produits qui dépendent des marchés ce qui rend difficile la prévision de la performance économique des cultures présentes dans leurs systèmes de culture. En particulier, **l'avantage économique potentiel des cultures associées dépend des prix de vente de chaque espèce associée mais aussi du différentiel de prix** qui sont des éléments difficiles à obtenir dans un contexte de volatilité élevée. Par ailleurs, comme l'ont montré Gooding et al. (2007) dans le cadre d'une étude sur les associations blé tendre-féverole menée dans cinq régions d'Europe, une augmentation de la concentration en protéines dans le blé de 10 g kg<sup>-1</sup> associée à une réduction de 25 à 30% du rendement du blé peut être avantageuse sur le plan économique dès lors que la légumineuse est correctement valorisée.

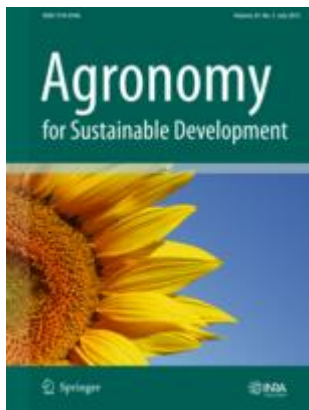
La thèse de Loïc Viguier et l'article publié en 2018 dans *Agronomy for Sustainable Development* sur les associations lentille-blé a démontré leur intérêt économique en mettant en évidence la nécessité de prendre en considération les pertes dues à la récolte mécanique et au tri des grains dont la qualité est insuffisante pour l'alimentation humaine pour une évaluation économique pertinente (**Encadré 2**).

Dans la partie qui suit nous avons voulu **savoir s'il existait, en agriculture biologique, un avantage économique à cultiver des cultures associées plutôt que des cultures pures**. Pour faire cette évaluation nous avons émis un certain nombre d'hypothèses à commencer par les prix de vente des produits fixés à : 260 € Mg<sup>-1</sup> pour le blé dur, 270 € Mg<sup>-1</sup> pour le blé tendre, 240 € Mg<sup>-1</sup> pour l'orge, 350 € Mg<sup>-1</sup> pour la féverole et 350 € Mg<sup>-1</sup> pour le pois et ce

indépendamment de la qualité des produits. Nous avons également **décidé d'intégrer une prime à la qualité afin de prendre en compte la plus grande valeur économique des céréales présentant de bonnes teneurs en protéines** à savoir : +60 € Mg<sup>-1</sup> pour le blé tendre et +90 € Mg<sup>-1</sup> pour le blé dur lorsque la concentration en protéines était respectivement supérieure à 11,5% et 13,5%. Notons que la prime qualité est supérieure pour le blé dur du fait de la difficulté à atteindre ce seuil en agriculture biologique mais également du fait que des grains riches en protéines présentent en général un taux de mitadin inférieur à 25% qui est requis par les semouliers.

Dans notre calcul économique nous avons voulu **exprimer le différentiel de marge entre les cultures pures et les cultures associées et donc seuls les coûts variables ont été intégrés** à savoir : (i) **le coût du semis** fixé à 40 € ha<sup>-1</sup> pour les cultures pures et les associations avec du pois semées en un seul passage et 80 € ha<sup>-1</sup> pour les associations avec de la féverole semées en deux passages, (ii) **le coût des semences** fixé à 100 € ha<sup>-1</sup> pour les cultures pures et les associations ayant une densité relative de 100% et proportionnellement plus élevé pour les associations additives ayant une densité relative supérieure à un, (iii) **le coût de la récolte** fixé à 80 € ha<sup>-1</sup> aussi bien pour les cultures pures et les cultures associées systématiquement récoltées en une fois et enfin (iv) **le coût du tri des cultures associées** estimé à 30 € Mg<sup>-1</sup> à l'exception de celles avec de l'orge qui sont destinés à être commercialisées en alimentation animale sans tri préalable. Il est à noter que nous n'avons pas pris en compte d'éventuels coûts liés à la fertilisation considérant que les engrais organiques étaient produits à la ferme et que le coût de l'épandage était négligeable.

Encadré 2 Résumé de l'article publié en 2018 dans Agronomy for Sustainable Development 38:39 sur l'extension du yield gap



## Yield gap analysis extended to marketable grain reveals the profitability of organic lentil-spring wheat intercrops

Loïc Viguié, Laurent Bedoussac, Etienne-Pascal Journet, Éric Justes

La lentille a été négligée par les agriculteurs biologiques en Europe, principalement en raison de ses **rendements faibles et instables, dus notamment à la verse et aux bruches**. Deux expérimentations ont été réalisées dans le sud-ouest de la France en 2015 et 2016 selon le cahier des charges de l'agriculture biologique avec quatre variétés de lentille et deux de blé cultivés seules ou en association. **Le concept du « Yield gap » a été adapté pour inclure les pertes dues à la récolte mécanique et à une qualité insuffisante pour l'alimentation humaine.**

Le rendement total de l'association avant la récolte mécanique est supérieur à la moyenne des cultures pures ( $1,91 \pm 0,47$  vs  $1,57 \pm 0,29$  t ha<sup>-1</sup>), avec un rendement moindre de lentille en association qu'en culture pure ( $1,06 \pm 0,28$  vs  $1,61 \pm 0,54$  t ha<sup>-1</sup>). Cela conduit à une marge brute avant la récolte mécanique en association inférieure par rapport à la lentille seule ( $1772 \pm 507$  vs  $2371 \pm 756$  € ha<sup>-1</sup>). **Le pourcentage de grains endommagés par les bruches ne diffère pas significativement entre culture associée et culture pure (41%)**. Par contre, la verse de la lentille est réduite en culture associée par rapport à la culture pure (15% vs 40%) ce qui améliore l'efficacité de la récolte mécanique des lentilles en association par rapport à la lentille seule (75% vs 50%). Cela aboutit à un **rendement de lentille récolté mécaniquement similaire en culture associée et en culture pure (0,80 t ha<sup>-1</sup>)**. *In fine*, la marge brute commercialisable des cultures associées est supérieure à celle des lentilles pures ( $949 \pm 404$  vs  $688 \pm 393$  € ha<sup>-1</sup>) du fait de la présence de blé.

Nous avons démontré pour la première fois l'intérêt d'étendre le concept du « Yield gap » à toutes les pertes de grains influençant la rentabilité, y compris celles liées à l'efficacité de la récolte et à la qualité des grains (**Figure 19**). En outre, il s'agit de la première démonstration de la rentabilité accrue des associations blé-lentille par rapport aux cultures pures, en dépit des coûts supplémentaires de tri.

Yield gap concept developed for lentil in sole crop and intercrop with spring wheat

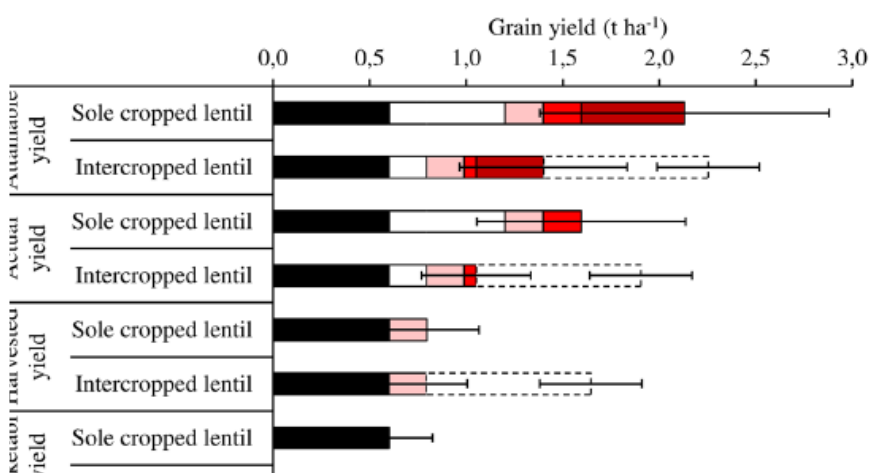


Figure 19 Analyse du « Yield gap » pour les associations blé-lentille et lentilles pures. Les barres correspondent à : (i) la masse de grains consommée par les bruches (rouge foncé), (ii) la masse de grains bruchés éliminée lors de la récolte (rouge) et lors du nettoyage des grains (rouge clair), (iii) la masse de grains sains perdus lors de la récolte (blanc), (iv) la masse de grains commercialisable de blé (hachuré) et de lentille (noir). N = 16 pour les associations et N = 8 pour les lentilles pures.

Nos résultats montrent **qu'il existe un avantage économique des cultures associées en agriculture biologique** qui s'explique par l'augmentation des rendements et de la teneur en protéines de la céréale. En moyenne, la marge brute des associations était de 702 vs 577 € ha<sup>-1</sup> pour la moyenne des cultures pures (**Figure 20**). Ce gain a été obtenu dans 80% des cas, dans 71% des cas par rapport à la céréale (520 € ha<sup>-1</sup>) et dans 70% par rapport à la légumineuse (634 € ha<sup>-1</sup>).

**L'avantage économique est accru les années où l'une des cultures pures a eu de faibles rendements** comme en 2009 pour les pois d'hiver (0,05 kg m<sup>-2</sup> en moyenne). Nos données soulignent également que **la variabilité de la marge brute est plus faible pour les cultures associées que pour les légumineuses seules** (écart-type de 335 € ha<sup>-1</sup> contre 493 € ha<sup>-1</sup>) mais supérieure aux céréales pures (246 € ha<sup>-1</sup>) et légèrement supérieur à la moyenne des cultures pures (302 € ha<sup>-1</sup>).

*In fine*, **la culture associée peut être considérée comme une forme d'assurance** en particulier par rapport aux légumineuses. Cependant, **les associations doivent être correctement triées après leur récolte** car cela détermine si la récolte peut être vendue pour la consommation humaine ou déclassée en alimentation animale. Ainsi, **le principal obstacle au développement de cette pratique réside dans la capacité à trier efficacement et à moindre coût**. Cet élément pose des questions pratiques en termes de choix de machines et de réglages mais aussi vis-à-vis de la logistique des organismes collecteur-stockeur. Cette question sera traité dans le **Chapitre 5** et un article a été publié en 2013 dans la revue *Economie Rurale* dans lequel nous avons **identifié les facteurs expliquant l'acceptation ou non des associations par les coopératives (Encadré 3)**.

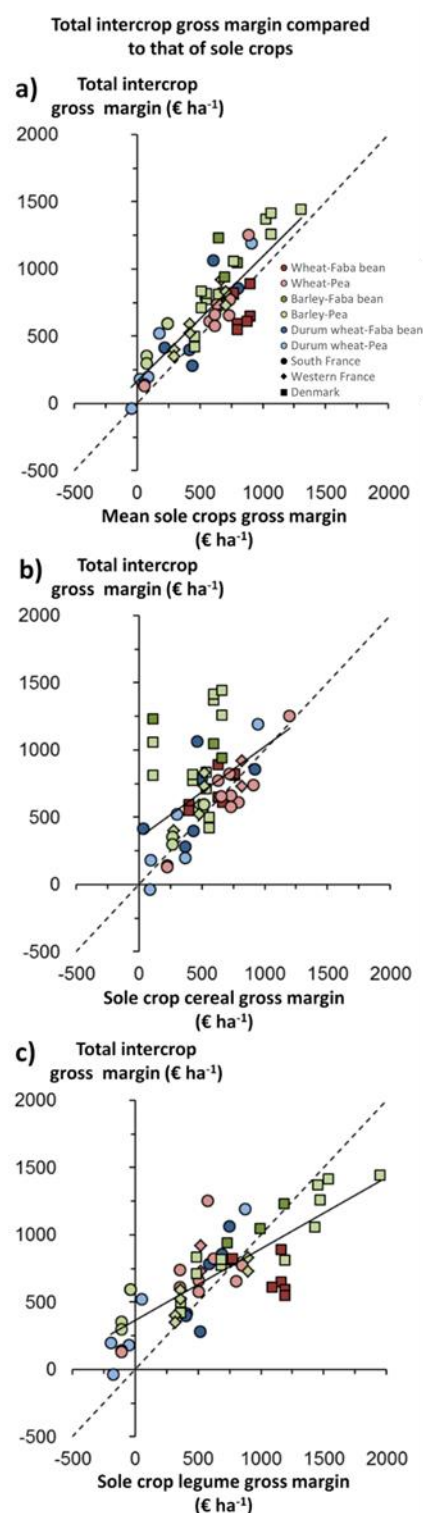


Figure 20 Marge brute calculée en considérant le coût des semences, du tri, de la récolte et une prime qualité pour (a) la culture associée en fonction de la moyenne des cultures pures ( $y = 0,93x + 166,12$ ;  $R^2 = 0,70$  \*\*\*), (b) la culture associée en fonction de la céréale pure ( $y = 0,68x + 350,09$ ;  $R^2 = 0,25$ \*\*\*) et (c) la culture associée en fonction de la légumineuse pure ( $y = 0,53x + 365,83$ ;  $R^2 = 0,61$  \*\*\*). N = 56. Bedoussac et al. (2015).



Encadré 3 Résumé de l'article publié en 2013 dans Economie rurale 338:25-45 sur la logistique des coopératives et l'acceptabilité des cultures associées blé dur-légumineuses



## Pratiques agricoles innovantes et logistique des coopératives agricoles. Une étude *ex-ante* sur l'acceptabilité de cultures associées blé dur-légumineuse

Marie-Benoît Magrini, Pierre Triboulet, Laurent Bedoussac

La diffusion de pratiques agricoles innovantes pose la question de leur acceptabilité au sein des filières. Cet article visait à évaluer *ex ante* les caractéristiques logistiques des coopératives agricoles susceptibles de favoriser l'adoption de ces pratiques et en particulier les cultures associées blé dur-légumineuses.

L'hypothèse posée est que les acteurs des filières peuvent être plus ou moins réceptifs à ces nouvelles pratiques selon les marges de manœuvre dont ils disposent pour faire évoluer leurs systèmes. Cet article s'appuie sur une enquête de l'organisation logistique des coopératives agricoles, collectant et stockant du blé dur en Midi-Pyrénées.

Il ressort de cette étude que les coopératives indiquant que leur logistique serait a priori compatible avec ces nouvelles pratiques sont aussi celles orientées vers une gestion par la qualité (Figure 21).

Ces coopératives sont dotées de moyens spécifiques et d'un ensemble de compétences favorisant l'adaptation à une plus grande diversité de cultures et présentent donc des capacités d'adaptabilité plus importantes.

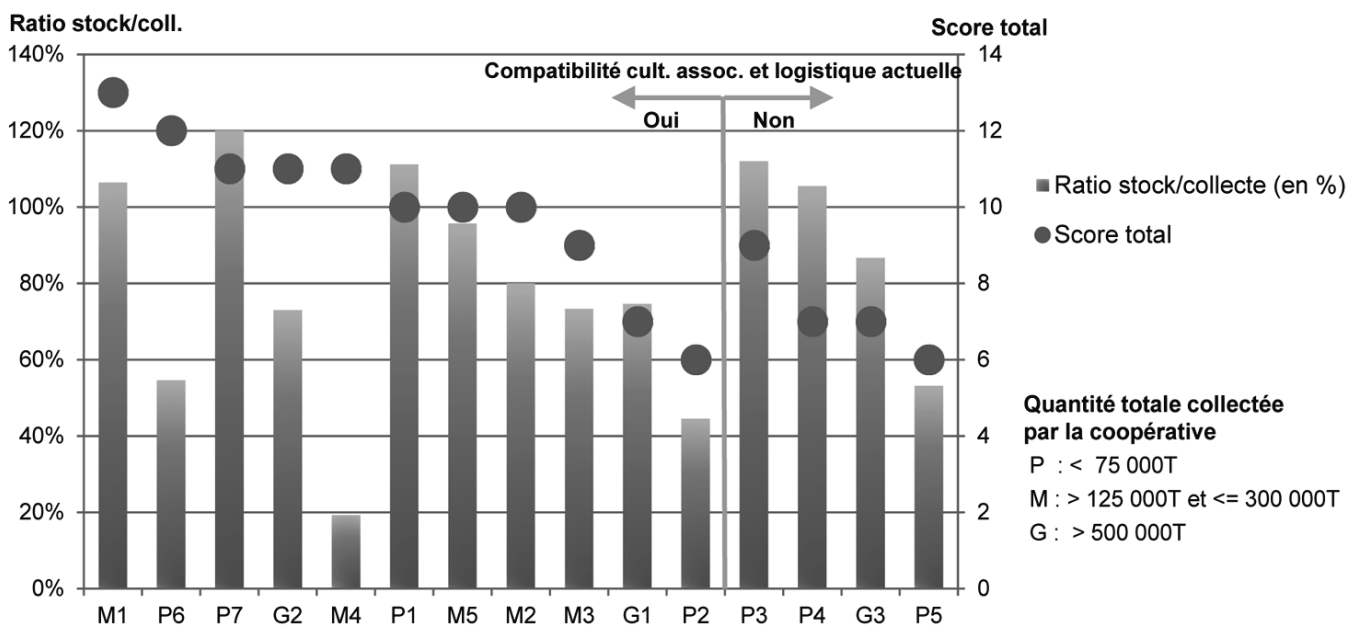


Figure 21 Répartition des coopératives en fonction de leur compatibilité logistique pour les cultures associées et leur score calculé par une méthode d'analyse multicritères basée sur le calcul de la somme pondérée d'un ensemble de critères en considérant dix critères identifiés lors d'entretiens et apparaissant comme des déterminants de l'orientation donnée à la gestion logistique.

## 6. Performance environnementale

L'évaluation de la performance économique et environnementale des cultures associées a fait l'objet en 2012 d'une publication dans European Journal of Agronomy qui est illustré dans l'Encadré 4.

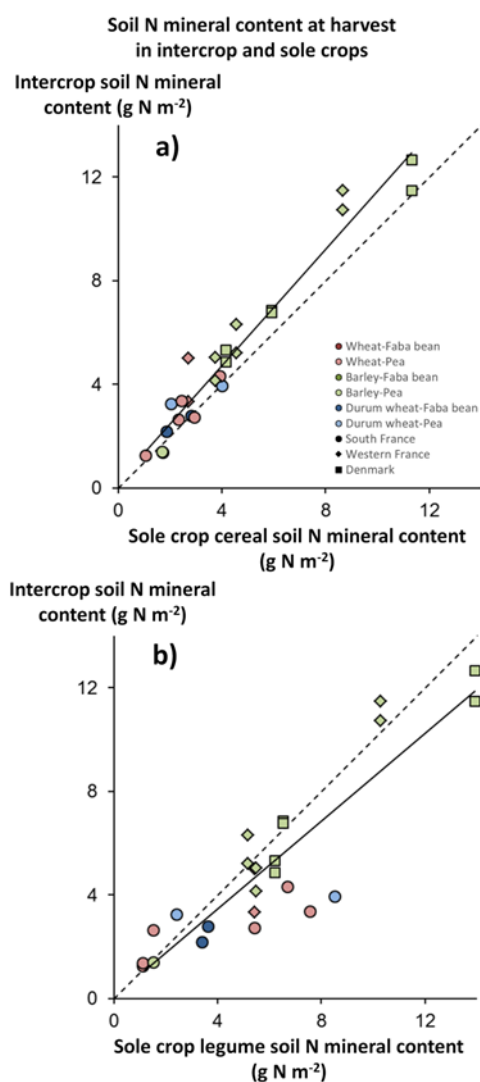


Figure 22 Teneur en azote minéral du sol à la récolte ( $\text{g N m}^{-2}$ ) après la culture associée en fonction de après (a) la céréale pure ( $y=1.16*x$ ;  $R^2=0.95^{***}$ ) et (b) la légumineuse pure ( $y=0.86*x$ ;  $R^2=0.80^{***}$ ).  $N = 25$ . Bedoussac et al. (2015).

Les cultures associées sont généralement fertilisées avec une quantité d'azote moindre que les cultures pures de céréales si bien que **le risque de lixiviation du nitrate est potentiellement réduit**

(Abad et al. 2004) et il en va de même comparativement aux légumineuses pures (Corre-Hellou 2005).

**La teneur en azote minéral du sol après la récolte est un indicateur du risque potentiel de lixiviation du nitrate.** En moyenne pour les cultures associée il était de  $5,1 \pm 3,2 \text{ g N m}^{-2}$ , soit légèrement supérieure à celui observé après les céréales pures ( $4,4 \pm 2,8 \text{ g N m}^{-2}$ ; **Figure 22**) et inférieur à celui après les légumineuses pures ( $6,0 \pm 3,4 \text{ g N m}^{-2}$ ; **Figure 22**). Cependant, la différence est relativement faible ne permettant pas de conclure sur le risque de lixiviation.

Pour obtenir de telles conclusions, **il faudrait tenir compte de la minéralisation des racines et des résidus de récolte** qui dépend entre autres de la quantité de biomasse et du rapport carbone/azote. Or, dans le cas des associations, ce dernier est généralement supérieur à celui des légumineuses pures mais inférieur à celui des céréales pures. Il faudrait aussi **prendre en compte les caractéristiques pédoclimatiques conditionnant la minéralisation et déterminant les transferts d'eau vers les couches profondes** ainsi que l'utilisation ou non de cultures intermédiaires (Justes et al. 2012).

## 7. Conclusions et perspectives

Nous avons montré que **les cultures associées présentaient de nombreux avantages et semblaient être une solution agronomique utile pour les systèmes de culture biologiques et plus globalement les systèmes à bas niveau d'azote.** Toutefois, pour favoriser la transférabilité des connaissances, il est nécessaire d'en comprendre les mécanismes. Le **Chapitre 4** qui suit s'attardera donc à expliquer la performance des associations à travers l'analyse de leur fonctionnement dont l'utilisation des ressources au cours du temps pour en améliorer notre compréhension.

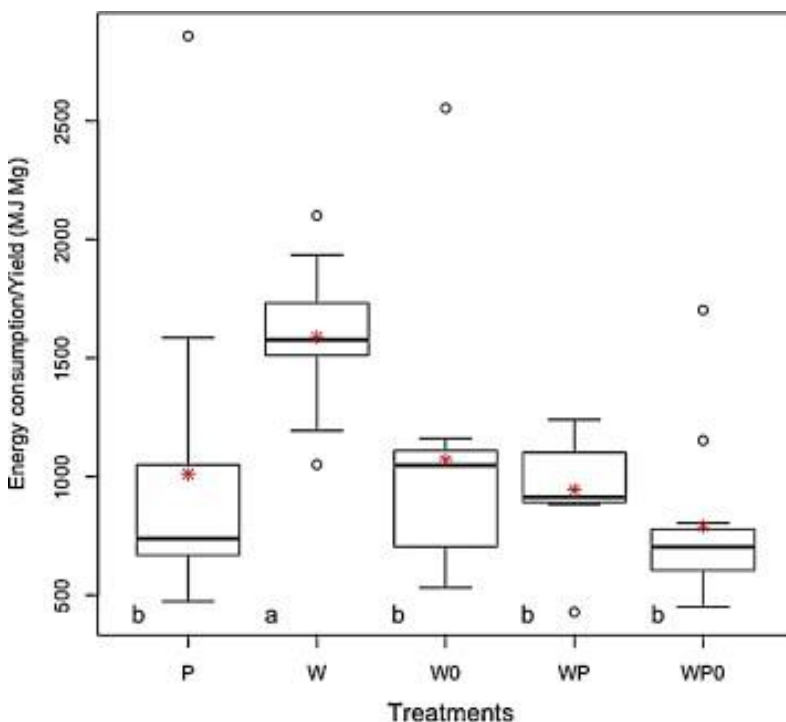
Encadré 4 Résumé de l'article publié en 2012 dans European Journal of Agronomy 40 :39-53 visant à évaluer la performance économique et environnementale des associations blé-pois.



## Pea-wheat intercrops in low-input conditions combine high economic performances and low environmental impacts

Elise Pelzer, Mathieu Bazot, David Makowski, Guénaelle Corre-Hellou, Christophe Naudin, Mehdi Al Rifaï, Edouard Baranger, Laurent Bedoussac, Véronique Biarnès, Patrick Boucheny, Benoit Carrouée, Daniel Dorvillez, Damien Foissy, Bernard Gaillard, Laurence Guichard, Marie-Chantal Mansard, Bertrand Omon, Loïc Prieur, Morgane Yvergniaux, Éric Justes, Marie-Hélène Jeuffroy

A partir d'un réseau de 16 sites-années à faible niveau d'intrants nous avons cherché à évaluer les performances agronomiques, environnementales, énergétiques et économiques d'associations blé-pois. Nous avons constaté que les rendements des cultures associées ( $4,5 \text{ Mg ha}^{-1}$  quelle que soit la quantité d'engrais appliquée) étaient supérieurs à ceux des cultures pures non fertilisées et proche du blé fertilisé ( $5,4 \text{ Mg ha}^{-1}$ ). Il est à noter que pour produire une tonne de grains, la culture associée nécessite moitié moins d'engrais que le blé fertilisé. Le LER et une analyse statistique fondée sur l'équation du prix ont montré que les mélanges étaient plus efficaces que les cultures pures, en particulier dans les situations non fertilisées. La quantité estimée d'énergie consommée par tonne de grains récoltée est quant à elle deux à trois fois plus élevée pour le blé fertilisé par rapport aux mélanges de blé-pois fertilisés ou non (Figure 23). Enfin, les cultures associées ont permis : (i) de maintenir la concentration en protéines et la marge brute par rapport à la culture pure du blé, (ii) d'augmenter la part de la fixation de  $\text{N}_2$  dans l'accumulation totale d'azote par le pois, (iii) de réduire l'utilisation des pesticides par rapport aux cultures pures et (iv) de réduire la quantité d'azote minéral dans le sol à la récolte par rapport à la culture pure



de pois. Nos résultats démontrent ainsi que la culture associée pois-blé est un moyen prometteur pour produire des céréales de manière efficace, économiquement durable et respectueuse de l'environnement.

Figure 23 Energie consommée par tonne de grain récoltée en matière sèche ( $\text{MJ Mg}^{-1}$ ) pour le pois pur non fertilisé (P), le blé pur fertilisé (WP), le blé pur non fertilisé (W0), l'association blé-pois fertilisée (WP) et l'association blé-pois non fertilisée (WP0). Les figures représentent : la moyenne (étoile), la médiane (traits horizontaux épais), les premiers et quatrièmes quartiles (traits fins horizontaux), les observations minimales et maximales (petits traits fins horizontaux) et les observations aberrantes (rond).

# CHAPITRE 4 : PROCESSUS EXPLICATIFS DES PERFORMANCES DES ASSOCIATIONS

## Plan du chapitre

Résumé du chapitre	60
Articles utilisés pour ce chapitre	60
Article principal	60
Articles servant d'illustration	60
1. Deux formes d'interactions	61
2. Intérêts et limites du LER	62
3. Les céréales sont plus compétitives	62
Encadré 5 Résumé de l'article publié en 2011 dans la revue Field Crops Research 124:25-36	63
4. L'association augmente le taux de fixation mais diminue la quantité fixée	64
5. Acquisition de la lumière et de l'azote	67
Encadré 6 Résumé de l'article publié en 2010 dans Plant and Soil 330:37-54	68
6. Des avantages accrus à bas niveau d'N	69
7. Pourquoi un gain de protéines ?	71
Encadré 7 Résumé de l'article publié en 2010 dans Plant and Soil 330:19-35	74
8. Analyse du fonctionnement dynamique	75
9. Conclusion et perspectives	75
Encadré 8 Résumé de l'article soumis à Field Crop Research en 2018 (en révision)	76

### Résumé du chapitre

- **Les complémentarités interspécifiques d'architecture aérienne et de dynamique de croissance expliquent en partie la meilleure interception de la lumière par les cultures associées** tout au long de la croissance, permettant une production de biomasse et un rendement supérieurs aux cultures pures.
- **Les céréales et les légumineuses associées sont en compétition pour l'acquisition de l'azote minéral du sol dans les stades précoces.**
- **Les céréales sont plus compétitives que les légumineuses, forçant ces dernières à accroître leur taux de fixation du N<sub>2</sub> atmosphérique par rapport à la culture pure (73% contre 61% d'azote issu de l'air).**
- Toutefois **la quantité d'azote fixé par la légumineuse en culture associée est inférieure à celle en culture pure** en raison d'une moindre biomasse produite, du fait d'une densité de plantes plus basse et surtout de la compétition exercée par les céréales pour l'acquisition de la lumière.
- **Le LER est négativement corrélé avec le rendement moyen des cultures pures et négativement corrélé à la disponibilité en azote minéral du sol.** Cela confirme que les cultures associées sont particulièrement adaptées aux systèmes à faible niveau d'azote et donc pourraient être un moyen approprié pour obtenir des rendements élevés et stables en agriculture biologique.
- **L'amélioration de la concentration en protéines des céréales en culture associée s'explique conjointement par : (i) la faible compétitivité des légumineuses pour l'azote minéral du sol et (ii) un rendement en céréale inférieur en culture associée** par rapport à la culture pure (0,19 et 0,29 kg m<sup>-2</sup> respectivement) du fait de la compétition exercée par la légumineuse pour les autres ressources et en premier lieu pour la lumière.

### Articles utilisés pour ce chapitre

#### Article principal

- **Bedoussac L., Journet E.-P., Hauggaard-Nielsen H., Naudin C., Corre-Hellou G., Jensen E. S., Prieur L., Justes E. (2015).** Ecological principles underlying the increase of productivity achieved by cereal-grain legume intercroppings in organic farming. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 35(3):911-935

#### Articles servant d'illustration

- **Bedoussac L., Justes E. (2010).** 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(1):19-35
- **Bedoussac L., Justes E. (2010).** 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(1):37-54
- **Bedoussac L., Justes E. (2011).** A comparison of commonly used indices for evaluating species interactions and intercrop efficiency: application to durum wheat-winter pea intercroppings. *Field Crops Research* 124:25-36
- **Bedoussac L., Journet E.-P., Justes E.** An original method based on yield components analysis to assess intraspecific, interspecific and G x E interactions in intercroppings: application to durum wheat - winter pea bispecific mixtures *Field Crop Research*

Comme précédemment, ce chapitre est basé pour l'essentiel sur l'article de synthèse publié en 2015 par Bedoussac L., Journet E.-P., Hauggaard-Nielsen H., Naudin C., Corre-Hellou G., Jensen E. S., Prieur L., Justes E. dans la revue *Agronomy for Sustainable Development* 35(3):911-935 sous le titre « **Ecological principles underlying the increase of productivity achieved by cereal-grain legume intercrops in organic farming. A review** ».

Par ailleurs j'ai choisi d'inclure dans ce chapitre de résultats des focus sur quatre articles publiés dont les résultats qui n'ont pas été développés ou tout du moins partiellement dans l'article de synthèse cité précédemment : **Encadré 5** : Bedoussac et Justes (2011) *Field Crops Research* 124:25-36; **Encadré 6** : Bedoussac et Justes (2010) *Plant and Soil* 330:37-54; **Encadré 7** : Bedoussac et Justes (2010) *Plant and Soil* 330:19-35 et **Encadré 8** : Bedoussac et al. *Field Crop Research* (en révision)

### 1. Deux formes d'interactions

Dans les mélanges multi-espèces, **les interactions entre espèces peuvent être représentées comme l'effet d'une espèce sur l'environnement et la réponse des autres espèces à ce changement** (Vandermeer 1989 ; Goldberg 1990). Les interactions sont complexes, se produisent de manière dynamique dans le temps et l'espace (Connolly et al. 1990) et dépendent, entre autres, de la disponibilité des nutriments, des conditions pédoclimatiques et des espèces et cultivars associés. Deux types d'interactions entre plantes ont été définis :

1. **La compétition se produisant lorsqu'une espèce modifie l'environnement de façon négative pour l'autre espèce** par exemple par de

l'ombrage ou par l'extraction d'une ressource qui devient limitante,

2. **La facilitation lorsque la modification de l'environnement est bénéfique pour l'espèce associée.** Cela peut être dû à des effets de barrière contre la propagation des agents pathogènes conférant *in fine* un avantage aux cultures associées en réduisant ces dernières (Vandermeer 1989 ; Hauggaard-Nielsen et Jensen 2005). La facilitation peut aussi être liée à des transferts de nutriments entre plantes ou à l'augmentation de la disponibilité en nutriments. L'effet de tuteur permettant de réduire la verse ou des phénomènes d'allélopathie sont aussi des formes de facilitation.

**Ces deux formes d'interactions, et leur importance relative, dépendent des espèces et des itinéraires techniques mis en œuvre en interaction avec le contexte pédoclimatique.** Ces interactions contribuent à donner un avantage global aux cultures associées en termes de rendement, de matière sèche ou de qualité notamment lorsque les compétitions interspécifiques sont moins fortes que les compétitions intraspécifiques. Ainsi nous pouvons distinguer deux résultantes positives de ces interactions :

1. **La complémentarité lorsque les espèces associées ne sont pas en compétition pour les mêmes ressources dans le temps, l'espace ou utilisent des formes chimiques différentes** permettant à l'association d'utiliser les ressources environnementales plus efficacement que les cultures pures (Willey 1979ab),
2. **La compensation lorsque les espèces diffèrent en terme de sensibilité aux stress abiotiques ou biotiques et que la disparition partielle ou totale d'une espèce est compensée par la croissance de l'autre espèce** « libérée » de la compétition.

## 2. Intérêts et limites du LER

Le LER est généralement utilisé pour déterminer si la culture associée produit plus que les cultures pures sur une surface similaire. Nous avons vu dans le **Chapitre 3** que les LER calculés à partir des rendements étaient presque systématiquement supérieurs à un (1,27 en moyenne). Néanmoins, comme souligné par Williams et McCarthy (2001), le potentiel du LER est rarement exploité. En effet, **représenter le LER partiel d'une espèce en fonction de celui de l'espèce qui lui est associée cela permet d'identifier l'avantage compétitif d'une espèce par rapport à l'autre, mais aussi les interactions négatives ou encore des situations de facilitation.**

La **Figure 24** qui représente le LER partiel de la légumineuse en fonction de celui de la céréale permet ainsi de mettre en évidence que **16% des traitements correspondent à des situations où la légumineuse produit plus par plante en culture associée qu'en culture pure.** En effet, pour ces traitements les  $LER_{Yield-Legume}$  sont supérieurs au ratio [densité de légumineuse en culture associée / densité de légumineuse en culture pure] et inversement pour le  $LER_{Yield-Cereal}$ . A l'opposé, **48% des traitements correspondent à des situations où la céréale produit plus par plante en culture associée qu'en culture pure** et inversement pour la légumineuse. Seulement **10% des cas correspondent à une situation où les deux espèces produisent moins par plante dans la culture associée** du fait des interactions inter- et intraspécifiques. Enfin, dans **26% des traitements les deux espèces se produisent plus par plante dans le mélange que dans les cultures pures** ce qui est l'expression synergique des phénomènes de complémentarité et ou de facilitation.

Yield land equivalent ratio for legume and cereal

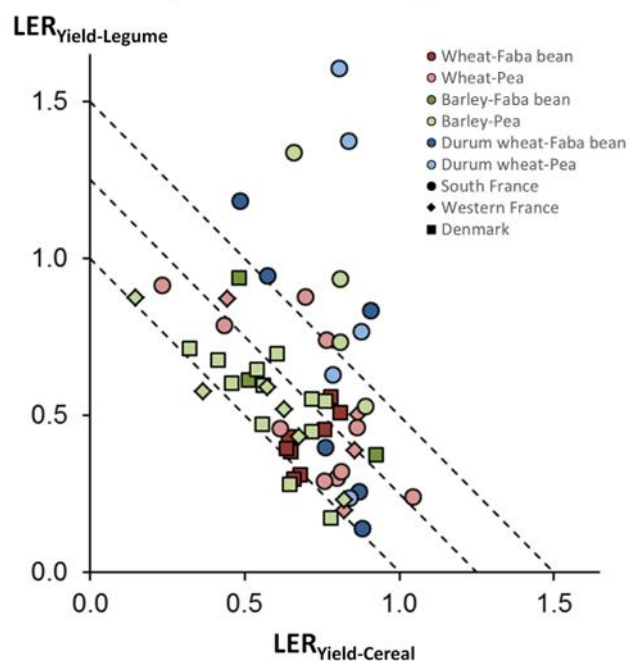


Figure 24 Land equivalent ratio partiel de la légumineuse calculé sur le rendement ( $LER_{Yield-Legume}$ ) en fonction de celui de la céréale ( $LER_{Yield-Cereal}$ ). N = 58. Bedoussac et al. (2015).

De nombreux autres indicateurs sont pertinents pour évaluer les interactions entre espèces et l'efficacité des associations (Weigelt et Joliffe 2003). Nous avons analysé sept indicateurs couramment utilisés pour évaluer la performance et le fonctionnement des associations dans un article publié dans Field Crop Research en 2011 (**Encadré 5**).

## 3. Les céréales sont plus compétitives

Les céréales associées sont le plus souvent plus productives que les légumineuses et ce indépendamment de la conduite (**Figure 25**). Par ailleurs, **plus le rendement de la céréale augmente plus celui de la légumineuse diminue**, suggérant une compensation de production entre les deux espèces. Cependant, la relation n'est pas linéaire, indiquant que **l'espèce dominante n'est pas totalement annihilatrice permettant toujours à l'espèce dominée de se développer et de produire des grains.**

Encadré 5 Résumé de l'article publié en 2011 dans la revue *Field Crops Research* 124:25-36 comparant divers indices largement utilisés pour évaluer l'efficacité des cultures associées et les interactions entre espèces.



## A comparison of commonly used indices for evaluating species interactions and intercrop efficiency: Application to durum wheat-winter pea intercrops

Laurent Bedoussac, Éric Justes

De nombreux indices sont disponibles pour évaluer les avantages potentiels des cultures associées et les interactions entre les espèces, mais **choisir un indice adapté est crucial pour faire des interprétations correctes**. Cette étude a **comparé et évalué sept indices bien connus et d'autres indices moins connus et donc peu utilisés mais potentiellement utiles** (AG : agressivité, REIc : indice d'efficacité relative cumulative, LER : land equivalent ratio, CC : changement de contribution, IE et IA : indices d'interactions inter- et intraspécifique, CGR : taux de croissance comparatif).

Pour évaluer la pertinence de ces indices nous avons utilisé les données issues d'une expérimentation de deux ans conduite dans le sud-ouest de la France avec différents niveaux de fertilisation azotée et comparant le blé dur (*Triticum turgidum* L., Nefer), le pois d'hiver (*Pisum sativum* L., cv Lucy) et leur association substitutive.

Nous avons montré que l'indice AG (calculé avec ou sans tenir compte des densités) ne permettait pas de conclure sur le fait qu'une espèce est dominante ou dominée, contrairement à ce qui est avancé dans la littérature. Par conséquent, son utilisation est clairement déconseillée sauf lorsqu'elle est analysée conjointement avec les LER partiels. **Le LER s'est avéré pertinent, polyvalent et utile pour illustrer le profil des compétitions dans les cultures associées, en particulier en représentant le LER partiel du blé en fonction de celui du pois.** Cependant, **le LER ne permet pas de distinguer les interactions inter- et intraspécifiques.** Pour ce faire, nous suggérons d'utiliser **les indices IE et IA qui peuvent également révéler des phénomènes de facilitation** et expliquer les évolutions de l'indice CC. **Les dynamiques d'interaction entre les espèces qui déterminent l'équilibre final peuvent être évaluées avec le CGR** que l'on privilégiera par rapport au REIc, en particulier lorsque les espèces diffèrent fortement en terme de production de biomasse.

**Choisir un indice adapté est essentiel pour bien comprendre et quantifier les interactions entre espèces** (globalement et dynamiquement) et ainsi évaluer correctement l'efficacité des cultures associées par rapport aux cultures pures. Ces indices peuvent *in fine* aider à révéler les caractéristiques des céréales et des légumineuses adaptées à la culture associée en vue de concevoir des itinéraires techniques de cultures associées efficaces. Cependant, **les indices doivent toujours être mis en relation avec les valeurs réelles de rendement, biomasse ou azote accumulé** car les sept indices comparés ne permettent pas d'évaluer intrinsèquement les performances quantitatives de production des cultures associées mais seulement leur(s) performance(s) relative(s) comparativement à celle des cultures pures.



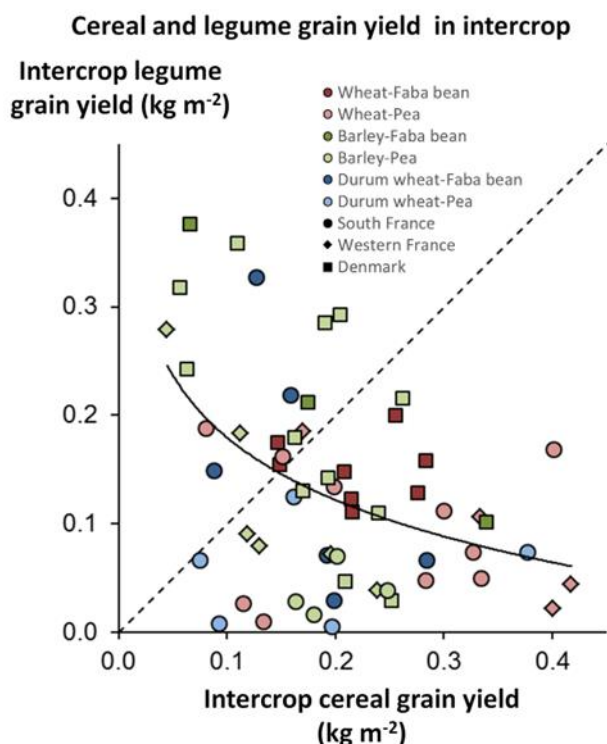


Figure 25 Rendement de la légumineuse associée ( $\text{kg m}^{-2}$ ) en fonction du rendement de la céréale associée ( $y = -0,08 \cdot \ln(x) - 0,01$ ;  $R^2 = 0,20$  \*\*\*).  $N = 58$ . Bedoussac et al. (2015).

Le fait que la céréale soit dominante dans la culture associée peut s'expliquer en partie par sa productivité en culture pure supérieure à celle de la légumineuse seule. Néanmoins, la proportion de céréale dans la culture associée est supérieure à celle calculée sur la base des rendements des cultures pures (3,9 contre 2,5 ; Figure 26). Ce résultat est également vrai lorsque les rendements des cultures pures sont corrigés pour tenir compte des densités relatives des espèces en association (3,9 contre 1,9 ; Figure 26). Cela indique donc que les céréales associées ont le plus souvent un avantage de croissance sur la légumineuse associée confirmant que les céréales sont plus compétitives que ces dernières, et ce, indépendamment de la conduite des associations (Vandermeer et al. 1998).

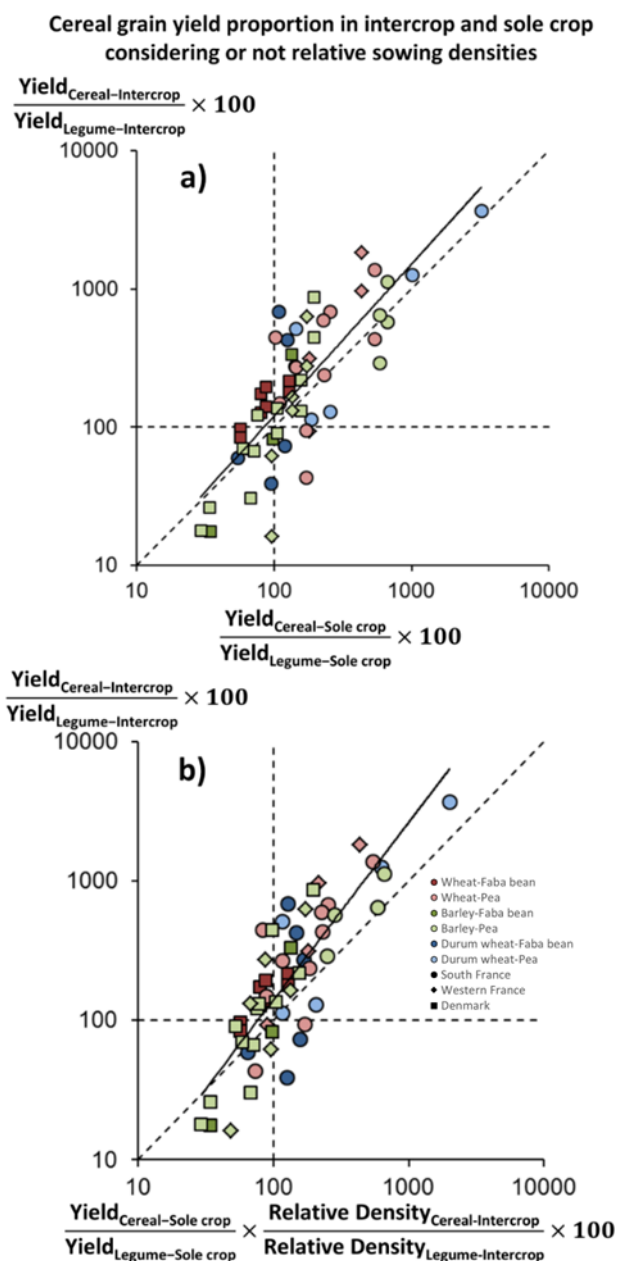


Figure 26 Rapport entre le rendement de la céréale et de la légumineuse en culture associée en fonction (a) de celui en cultures pures ( $y = 0,77 \cdot x + 1,10$ ;  $R^2 = 0,63$  \*\*\*) et (b) de celui en cultures pures corrigé par la densité relative des espèces en association en pourcentage de la densité en culture pure ( $y = 0,40 \cdot x + 1,27$ ;  $R^2 = 0,70$  \*\*\*).  $N = 58$ . Bedoussac et al. (2015).

#### 4. L'association augmente le taux de fixation mais diminue la quantité fixée

La meilleure performance des cultures associées généralement observée dans les systèmes à bas niveau d'azote s'explique l'utilisation complémentaire par les deux espèces de l'azote disponible à savoir l'azote

## CHAPITRE 4 : PROCESSUS EXPLICATIFS DES PERFORMANCES DES ASSOCIATIONS

minéral du sol et le N<sub>2</sub> atmosphérique (Ofori et Stern 1987 ; Jensen 1996a ; Bedoussac et Justes 2010ab ; Corre-Hellou et al. 2006 ; Naudin et al. 2010). Ceci est particulièrement intéressant en agriculture biologique où l'azote minéral peut être un facteur limitant et où les légumineuses sont particulièrement intéressantes du fait de leur capacité à couvrir la majeure partie de leurs besoins en azote par la fixation symbiotique du N<sub>2</sub> atmosphérique.

Néanmoins, **la formation des nodules et la mise en place de l'activité symbiotique sont des mécanismes coûteux énergétiquement et en nutriments pour la plante et qui se font graduellement** (Tricot et al. 1997 ; Voisin et al. 2002). Par conséquent, au début de leur développement les légumineuses dépendent des réserves en azote des graines et de l'azote minéral du sol (Mahon et Child 1979). Dès lors avant que cette complémentarité de niche pour l'azote ne s'installe au sein du couvert, les deux espèces associées sont en compétition pour l'acquisition de l'azote minéral du sol.

**Or l'avantage concurrentiel d'une espèce par rapport à l'autre dépend surtout des différences (i) de vitesse d'avancement du front d'enracinement (Hamblin et Tennant 1987), ainsi que (ii) de leur demande/besoins en azote (Hauggaard-Nielsen et al. 2001a ; Bellostas et al. 2003 ; Andersen et al. 2004).** En début de cycle, **l'importance relative de ces deux mécanismes dépend de la disponibilité en azote minéral** du sol : (i) si la disponibilité en azote est faible alors le partage de l'azote minéral du sol sera avant tout déterminé par les différences de profondeur d'enracinement et (ii) si la disponibilité en azote est plus élevée se sont les différences de demande en azote qui vont piloter le partage de cette ressource (Corre-Hellou et al. 2007).

Ces mécanismes expliquent pourquoi la céréale est généralement favorisée dans les premiers stades de développement. En effet, sa croissance racinaire plus rapide se traduit ensuite par une plus grande compétitivité interspécifique pour l'azote minéral du sol par rapport à la légumineuse (Jensen 1996a). Cela conduit à une diminution rapide de la quantité d'azote minéral disponible dans la couche superficielle du sol où se produit la fixation symbiotique. Ainsi **les légumineuses sont « contraintes » à dépendre principalement de la fixation symbiotique du N<sub>2</sub>** (Hauggaard-Nielsen et al. 2001a) pour répondre à leurs besoins en azote (Croizat et al. 1994 ; Voisin et al. 2002 ; Naudin et al. 2010). En d'autres termes, c'est via une compétition pour l'accès à une ressource que la complémentarité de niche s'exprime fortement.

Ce processus est confirmé par le fait que **le pourcentage de l'azote acquis issu de la fixation symbiotique (Figure 27) est plus élevé dans le cas des légumineuses associées par rapport aux cultures pures** (73 % vs 61% ; Jensen 1996a ; Corre-Hellou et al. 2006 ; Hauggaard-Nielsen et al. 2009b ; Naudin et al. 2010). Dès lors, **la céréale associée dispose de la majorité de l'azote minéral du sol** ce qui correspond à une quantité à peine légèrement plus faible qu'en culture pure de céréale mais pour un nombre de plantes et un rendement souvent moindre. Ainsi l'absorption minérale d'azote par plante et par grain de céréale est supérieure en culture associée qu'en culture pure.

Cependant, ces mécanismes dépendent de l'évolution de la quantité d'azote minéral dans le sol au cours du temps. Les résultats obtenus par Naudin et al. (2010) ont montré que **le taux de fixation des légumineuses dans des associations non fertilisées augmentait progressivement au cours du temps jusqu'à atteindre 90% en fin de cycle.** Ils ont

## CHAPITRE 4 : PROCESSUS EXPLICATIFS DES PERFORMANCES DES ASSOCIATIONS

également montré que des variations de la disponibilité en azote minéral du sol d'environ 1,4 à 6,0 g N m<sup>-2</sup> dans la couche supérieure (0-30 cm) avant le stade reproductif des pois ne réduisait pas ce taux.

**linéaire en fonction de la teneur en nitrate** dans la couche 0-30 cm ( $y = -1,92*x + 103,64$ ;  $R^2 = 0,96$  \*\*) jusqu'à une inhibition totale avec des concentrations comprises entre 3,5 et 5,0 g m<sup>-2</sup> conformément à Voisin et al. (2002).

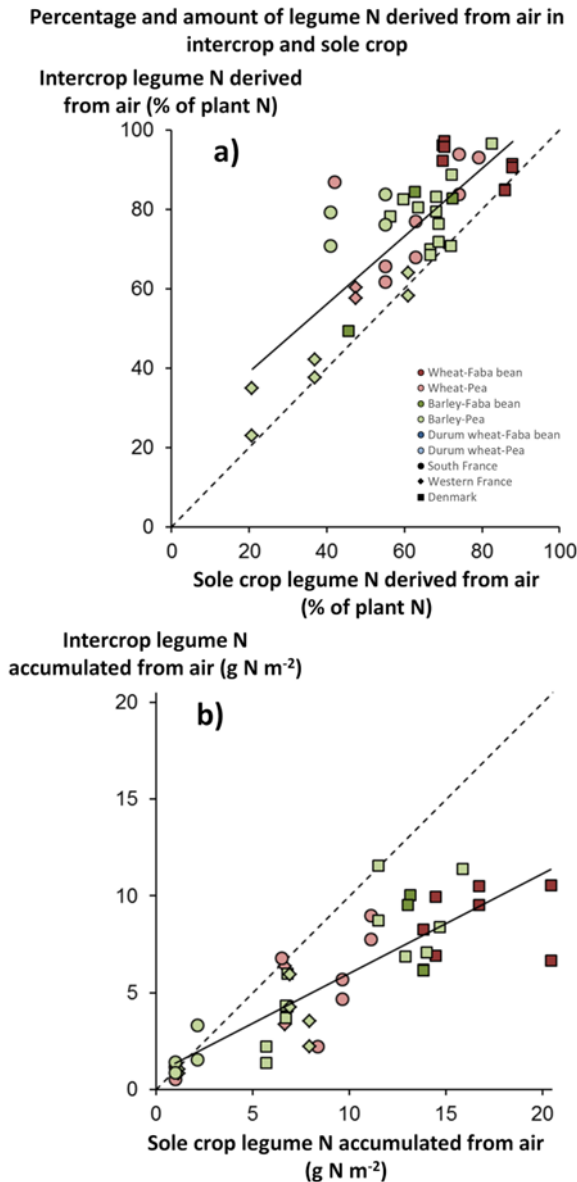


Figure 27 (a) Pourcentage d'azote issu de la fixation symbiotique en culture associée en fonction de celui en culture pure ( $y=0.86*x+22.00$ ;  $R^2=0.62$ \*\*\*) et (b) quantité d'azote issue de la fixation symbiotique (g N m<sup>-2</sup>) en association en fonction de celui en culture pure ( $y=0.51*x+0.85$ ;  $R^2=0.71$ \*\*\*). N = 43. Bedoussac et al. (2015).

Par contre l'accroissement de la disponibilité en azote minéral dans les stades précoces conduit à une forte diminution du taux de fixation et ce de façon

Toutefois, ces travaux ont montré que **cette inhibition de la fixation du N<sub>2</sub> était transitoire** si bien qu'au final, le taux de fixation de la légumineuse dans une association fertilisée atteignait à maturité la même valeur que dans une association non fertilisée. Par contre, **un apport d'azote tardif, pendant la floraison des pois, entraîne une diminution du taux de fixation qui ne peut plus être rattrapé** ensuite. Il en va de même de la croissance des plantes qui, si elle est réduite à certains stades de développement ne peut être compensée plus tard dans le cycle par des composantes du rendement mises en œuvre tardivement. Par exemple, si le nombre de grains par m<sup>2</sup> est fortement réduit, alors le poids d'un grain ne peut s'accroître suffisamment pour compenser cette perte préalable surtout en cas de stress hydriques et/ou thermiques.

Bien que la fixation symbiotique des légumineuses associées puisse être affectée de façon transitoire, **l'apport précoce d'azote minéral tend à favoriser la production de biomasse de la céréale** au détriment de celle de la légumineuse. Ainsi, **l'apport précoce d'azote minéral se traduit souvent par une moindre quantité d'azote fixée par la légumineuse associée** par rapport aux situations à faible disponibilité en azote, car la compétition de la céréale sur la légumineuse est alors exacerbée. En effet, **on observe que la quantité d'azote fixée par cette dernière est supérieure en culture associée par rapport à celle de la culture pure** conduite avec la même quantité d'azote (Figure 27), et ce malgré un taux de fixation

moindre. Cela s'explique par le fait que la biomasse de la légumineuse est réduite en association par rapport à la culture pure du fait de la compétition des céréales notamment pour l'acquisition de la lumière (Bedoussac et Justes 2010a).

Ces résultats montrent que **la quantité d'azote fixée entre les légumineuses associées et pures est avant tout déterminée par les différences de croissance des deux espèces associées, conditionnant ainsi la production de biomasse des légumineuses, ceci plus que par des différences du taux de fixation symbiotique**. Naudin et al. (2010) ont ainsi estimé que la biomasse du pois expliquait 90% de la variabilité de la fixation du N<sub>2</sub> quel que soit la disponibilité en azote.

### 5. Acquisition de la lumière et de l'azote

Cette question de l'acquisition de la lumière et de l'azote a été traitée dans un article publié en 2010 dans *Plant and Soil* 330:37-54 (**Encadré 6**).

En l'absence de facteurs abiotiques et biotiques limitants, **la production de biomasse dépend principalement du rayonnement absorbé** (Loomis et Williams 1963) aussi bien dans le cas des cultures pures (Shibles et Weber 1966 ; Monteith 1977 ; Kiniry et al. 1989) que des cultures associées (Natarajan et Willey 1980ab ; Sivakumar et Virmani 1980 ; Sivakumar et Virmani 1984).

Une meilleure utilisation de la lumière tout au long du cycle cultural contribuerait donc à donner un avantage aux cultures associées comparativement aux cultures pures en terme de production de biomasse et de rendement. Pour cela, les couverts doivent **optimiser l'utilisation de la lumière à la fois dans l'espace et dans le temps au travers des complémentarités interspécifiques en termes d'architectures aériennes et de dynamiques de**

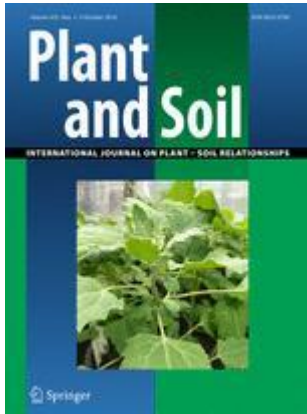
**croissance** (Trenbath 1986 ; Tsubo et al. 2001 ; Tsubo et Walker 2002 ; Poggio 2005).

Toutefois, en cultures associées, l'efficacité de l'interception de la lumière ne dépend pas seulement des caractéristiques de chaque espèce en terme de surface foliaire et de coefficient d'extinction de la lumière (Sinoquet et Caldwell 1995). En effet, en raison de l'hétérogénéité spatiale de la canopée des cultures associées, **la distribution de l'énergie lumineuse dans le couvert et entre les espèces dépend également, et de façon non exhaustive : (i) des valeurs relatives de hauteur, (ii) de la distribution spatiale du profil de surface foliaire, et (iii) de la dynamique de croissance** (Fukai 1993 ; Midmore 1993 ; Barillot et al. 2014ab).

Par ailleurs, il est globalement admis que la répartition du rayonnement dans la canopée des cultures associées est principalement influencée par la compétition sur le gradient vertical du couvert (Spitters et Aerts 1983 ; Caldwell 1987 ; Cudney et al. 1991 ; Cenpukdee et Fukai 1992ab), et deuxièmement, par l'orientation des rangs et le coefficient d'extinction des feuilles de chaque espèce.

**L'acquisition de l'azote et l'interception de la lumière sont deux processus intimement liés influencés par la dynamique de croissance des systèmes racinaires et aériens** (Dreccer et al. 2000). Le statut azoté est un indicateur du niveau de satisfaction de la demande en azote des cultures (Lemaire et Gastal 1997) et un déterminant de la croissance des feuilles. Par conséquent, **la disponibilité en azote influence la répartition du rayonnement en modifiant la proportion des espèces dans la surface foliaire totale** des cultures associées (Gastal et Belanger 1993).

Encadré 6 Résumé de l'article publié en 2010 dans Plant and Soil 330:37-54 visant à analyser la dynamique des compétitions et des complémentarités pour l'utilisation de la lumière et de l'azote dans des associations de blé dur-pois d'hiver



## 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

Laurent Bedoussac, Éric Justes

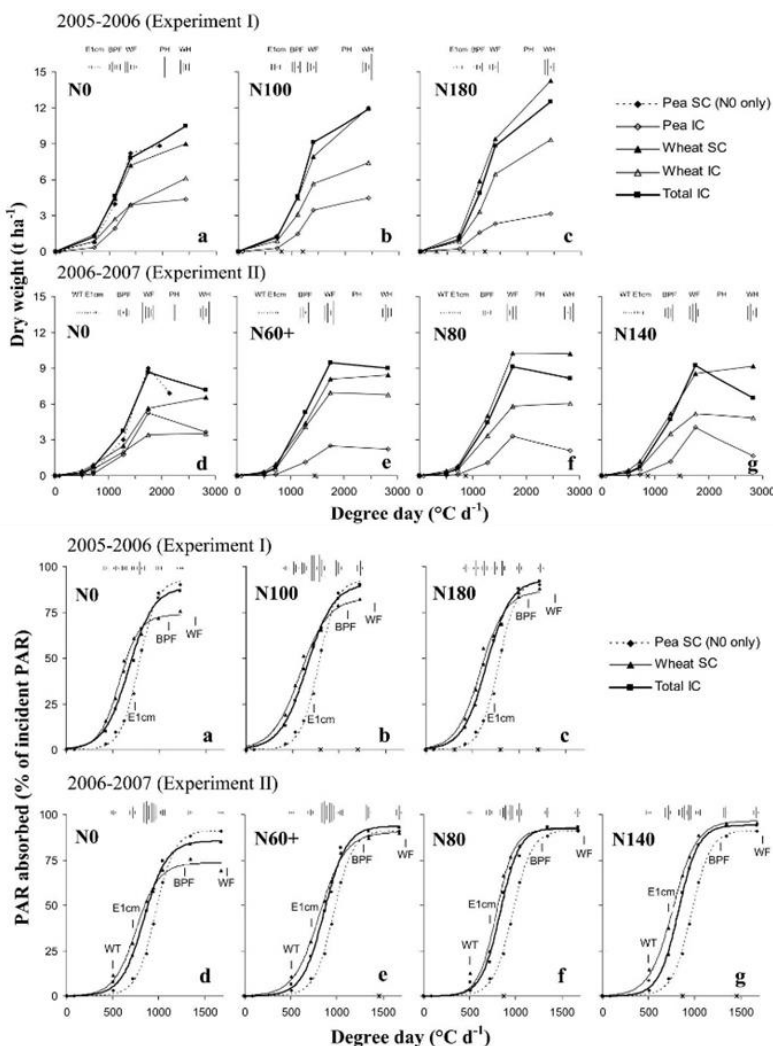
Le but de cet article était d'analyser la dynamique de croissance et l'acquisition des ressources tout au long du cycle des cultures pour expliquer le rendement en grain des espèces. Pour ce faire nous avons fait varier la disponibilité en azote par la fertilisation azotée (quantité et fractionnement des doses) au cours de deux expérimentations conduites en 2005 et 2006. Nous avons analysé en dynamique (**Figure 28**) : (i) la biomasse aérienne, (ii) le LAI et la hauteur ainsi que (iii) l'acquisition de l'azote et de la lumière.

L'apport d'azote du tallage jusqu'au stade épi 1 cm de blé entraîne une légère augmentation de la croissance des céréales en hiver, mais une forte augmentation au début du printemps. Ainsi, il y a moins de lumière disponible pour

la légumineuse pendant sa croissance ce qui réduit sa biomasse et celle de l'association.

*A contrario*, dans des conditions de faible disponibilité en azote, la céréale exerce une compétition moins forte sur la légumineuse pour l'acquisition de la lumière du fait d'une croissance précoce du blé fortement limitée par la faible disponibilité en azote minéral du sol.

Figure 28 Evolution de la biomasse aérienne (t ha<sup>-1</sup>) et Evolution de la fraction de PAR absorbée (%) du blé et du pois en culture pure (SC) et en culture associée (IC) pour différents niveaux de fertilisation azotée (N<sub>x</sub> où 'x' représente la quantité d'azote minérale appliquée en kg N ha<sup>-1</sup>). Les valeurs sont la moyenne de n=3 à 5. Pour chaque date de prélèvement les barres verticales au-dessus des figures correspondent aux écart-types successivement pour le total de l'association, le blé associé, le pois associé, le blé pur et le pois pur. Les astérisques indiquent les dates des apports d'engrais. Les courbes correspondent à des ajustements non linéaires selon :  $F_{PARa} = F_{PARmax} \times \left( \frac{\exp(K1 \times (t-K2))}{1 + \exp(K1 \times (t-K2))} \right)$



Par ailleurs, en utilisant des techniques de compartimentation entre systèmes racinaires et aériens, Wilson (1988) a montré que **la compétition racinaire pour l'utilisation des ressources est plus déterminante généralement que la compétition aérienne pour la lumière**, bien qu'il ne soit pas possible d'étudier séparément au champ ces deux processus. Quoi qu'il en soit, l'absorption d'azote par les plantes est en interaction permanente avec la croissance aérienne (Corre-Hellou et al. 2006) et sous l'influence des conditions environnementales qui déterminent entre autre la quantité d'eau du sol disponible.

### 6. Des avantages accrus à bas niveau d'N

De nombreuses études suggèrent que **les cultures associées sont particulièrement adaptées aux systèmes à faible disponibilité en azote** (Willey 1979ab ; Ofori et Stern 1987 ; Vandermeer 1989 ; Willey 1990 ; Fukai et Trenbath 1993 ; Jensen 1996a ; Hauggaard-Nielsen et al. 2003 ; Corre-Hellou et al. 2006). **De tels résultats ont été rapportés pour diverses cultures associées et sous différents climats, qu'ils soient arides, semi-arides, tropicaux ou tempérés** (Fujita et al. 1992 ; Ofori et Stern 1987 ; Jensen 1996a ; Naudin et al. 2010).

Dans notre article Bedoussac et Justes (2010a) nous avons mis en évidence que **les cultures associées de blé dur--pois d'hiver étaient avantageuses lorsque la disponibilité en azote totale sur le cycle cultural était inférieure à 12 g N m<sup>-2</sup>** (azote minéral du sol et azote apporté par l'engrais) et avec une quantité d'azote minéral au semis faible (< 5 g N m<sup>-2</sup> sur tout le profil de sol). En effet, **ces conditions permettent d'optimiser la complémentarité entre les deux espèces pour l'utilisation de l'azote** (azote minéral du sol et N<sub>2</sub>). Inversement, **lorsqu'un apport**

**d'engrais azoté est réalisé de façon précoce (en fin d'hiver), la croissance et le rendement des légumineuses associées sont significativement réduits**, tandis que ceux du blé augmentent pénalisant la performance globale de l'association.

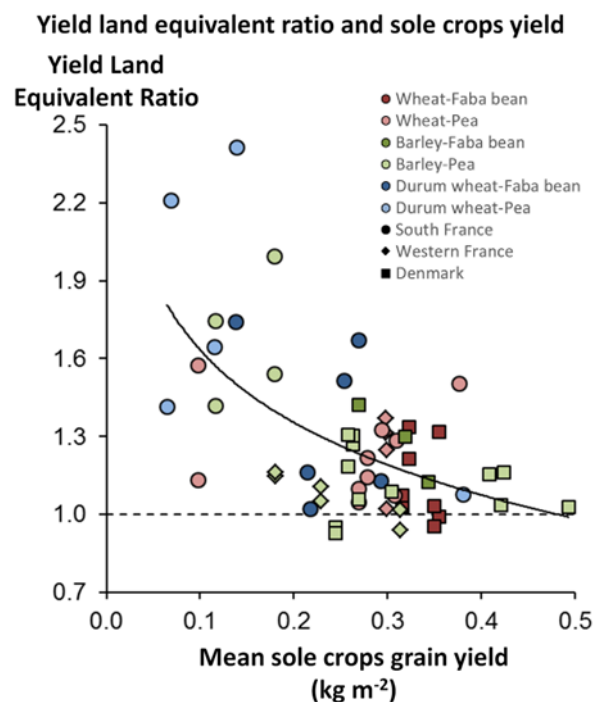


Figure 29 Land equivalent ratio calculé à partir du rendement en fonction du rendement moyen des cultures pures (kg m<sup>-2</sup>;  $y=0.84*x-0.28$ ;  $R^2=0.34***$ ). N = 56. Bedoussac et al. (2015).

Ceci est illustré par nos résultats obtenus en agriculture biologique qui indiquent l'existence d'une **corrélation négative entre LER et rendement moyen des cultures pures (Figure 29)**, avec des valeurs de LER élevées (> 1,5) qui correspondent généralement à de faibles niveaux de rendement de l'une ou des deux cultures pures. En effet, dans ce cas, une petite augmentation de production peut conduire à des valeurs de LER élevées puisque cet indicateur est relatif. Nous avons également observé une **corrélation légèrement négative entre les LER calculés sur la base du rendement et la quantité d'azote acquise par la céréale pure (Figure 30)**, illustrant que cette

## CHAPITRE 4 : PROCESSUS EXPLICATIFS DES PERFORMANCES DES ASSOCIATIONS

dernière est un bon indicateur de la disponibilité totale en azote.

Dans une gamme similaire de disponibilité en azote et dans le cas d'associations pois-orge de printemps, Corre-Hellou et al. (2006) ont montré que **les valeurs de LER les plus élevées sont obtenus lorsque la concurrence entre les plantes pour l'acquisition de l'azote minéral du sol était élevée**, correspondant : (i) à une faible disponibilité en azote minéral du sol ou (ii) à une densité de plantes de céréale élevée.

Yield land equivalent ratio and cereal N accumulated

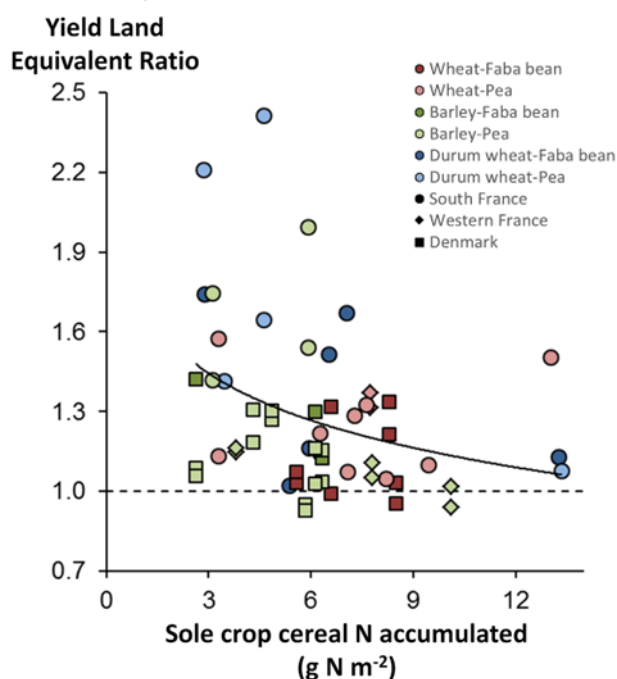


Figure 30 Land equivalent ratio en fonction de la quantité d'azote acquise par la céréale dans les parties aériennes ( $\text{g N m}^{-2}$ ;  $y=2.59*x-0.18$ ;  $R^2=0.12^{**}$ ).  $N = 56$ . Bedoussac et al. (2015).

**Dans le cas de notre étude conduite en agriculture biologique, les quantités d'azote acquises par les céréales dans les parties aériennes sont relativement faibles**, se situant en moyenne entre 2,6 et 13,3  $\text{g N m}^{-2}$ . Cette gamme doit être comparée aux plus de 30  $\text{g N m}^{-2}$  que peut acquérir un blé cultivé de façon conventionnelle. Ces faibles niveaux de

disponibilité en azote pourraient expliquer le fait que la corrélation entre le LER et l'azote acquis par la céréale n'est pas hautement significative comparativement à ce nous avons pu observer en système conventionnel avec fertilisation azotée minérale (Bedoussac et Justes 2010a) conduisant à des cultures pures de blé dur qui ont absorbé entre 7,5 et 20  $\text{g N m}^{-2}$  selon le niveau de fertilisation azotée.

*In fine*, **l'avantage relatif des cultures associées ( $\text{LER}_{\text{Yield}} > 1$ ) semble être d'autant plus important que le rendement des cultures pures ou la quantité d'azote disponible est faible**. Cela confirme que les cultures associées sont particulièrement adaptées aux systèmes à faible niveau d'intrants conduisant à une disponibilité en azote réduite comme souvent en agriculture biologique. De plus, ces deux relations suggèrent que si **l'efficacité des cultures associées pour la production de grains par rapport aux cultures pures dépend de la disponibilité en azote, elle dépend aussi des facteurs biotiques et abiotiques** autres que l'azote qui pourraient avoir eu un impact négatif sur le rendement des cultures pures.

Enfin, le fait que les relations entre LER et rendement moyen des cultures pures d'une part, et entre LER et quantité d'azote accumulée par la céréale pure d'autre part, ne soient pas hautement significatives s'explique par la diversité de notre jeu de données en termes d'espèces, de densités et d'utilisation ou non de fertilisation. Quoi qu'il en soit, dans l'ensemble des situations analysées **les cultures associées présentent un avantage en terme de rendement lorsque les composantes associées ne sont que partiellement en concurrence pour les mêmes ressources** renforçant dans ces conditions la complémentarité entre espèces.

7. Pourquoi un gain de protéines ?

L'amélioration de la concentration en protéines des grains de céréale dans les cultures associées est quasi systématique. Elle peut s'expliquer par une augmentation de la quantité d'azote minéral disponible par masse de grain produit et/ou par un meilleur ajustement entre les besoins en azote de la culture et la disponibilité en azote du sol.

La première hypothèse serait que le gain de teneur en protéines des grains de la céréale serait dû à une plus faible production en culture associée par rapport à la culture pure que l'on retrouve dans 98% de nos expériences (0,19 et 0,29 kg m<sup>-2</sup> respectivement). La Figure 31 montre l'existence d'une telle relation mais cette première explication est insuffisante car la disponibilité d'azote par grain est aussi modifiée par l'effet combiné des compétitions entre plantes.

Cereal land equivalent ratio for grain protein and yield

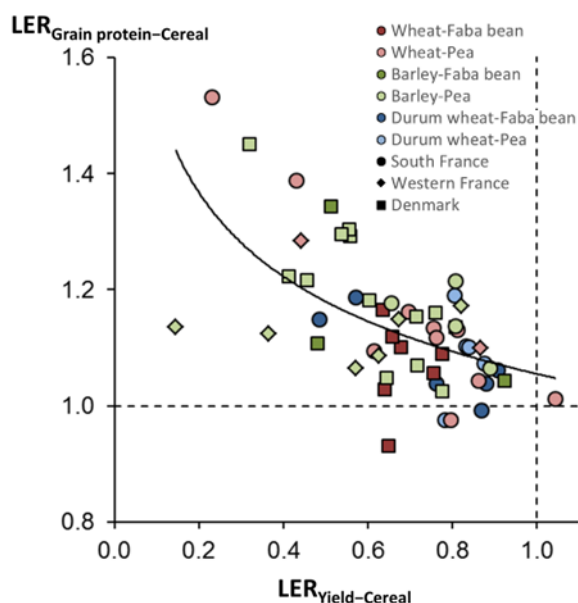


Figure 31 Land equivalent ratio partiel de la céréale calculé sur la base de la teneur en protéines des grains en fonction de celui calculé sur la base rendement ( $y=1.06*x-0.16$ ;  $R^2=0.34^{***}$ ). N = 56. Bedoussac et al. (2015).

Ainsi, dans le cadre de ma thèse (Bedoussac 2009) j'ai montré que la concentration en protéines des

grains de la céréale en association était fortement corrélée avec celle de la culture pure, qui dépend de la réponse du génotype aux conditions environnementales. Ce résultat sous-entend que l'on pourrait estimer correctement la teneur en protéines des céréales en association à partir de celle en culture pure en prenant comme co-variable la perte de rendement en association par rapport à la culture pur qui n'est autre que le LER partiel de la céréale calculé sur le rendement ( $LER_{Yield-Cereal}$ ) illustré par la Figure 32.

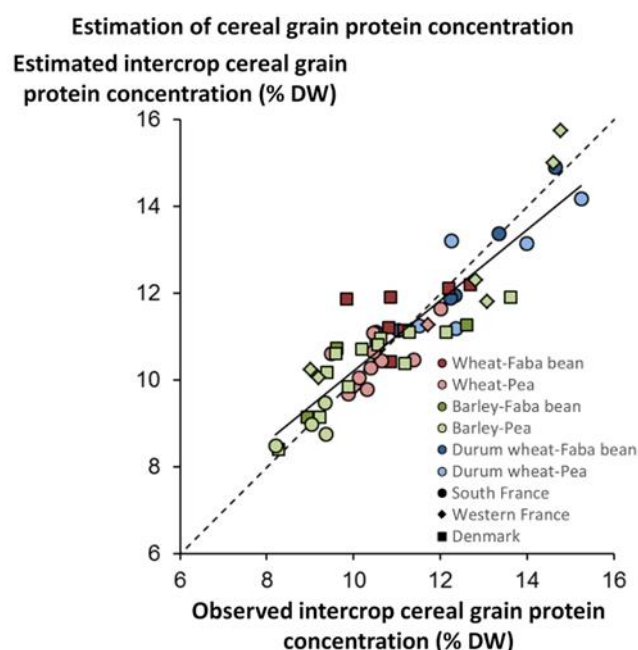


Figure 32 Teneur en protéines des grains (GPC) de la céréale estimée en fonction de la teneur en protéines des grains observée ( $y=0.82*x+2.05$ ;  $R^2=0.82^{***}$ ) en considérant le modèle linéaire suivant :  $GPC_{Cereal-Associée} = a * GPC_{Cereal-Pure} + b * LER_{Yield-Cereal} + c$  avec  $a=0.90$ ;  $b=-3.35\%$ ;  $c=4.56\%$ ;  $RMSE=0.73\%$  et  $Biais=0.00\%$ . N = 56. Bedoussac et al. (2015).

Les résultats de Gooding et al. (2007), confirmés par nos travaux (Bedoussac et Justes 2010ab) expliquent que l'effet de la culture associée sur la concentration en protéines des grains de céréale est bien dû à une plus grande disponibilité en azote par grain produit qui résulte de : (i) la faible compétitivité des légumineuses pour l'azote minéral par rapport aux



## CHAPITRE 4 : PROCESSUS EXPLICATIFS DES PERFORMANCES DES ASSOCIATIONS

céréales, combinée à (ii) la compétition de la légumineuse pour la lumière, l'eau et les autres nutriments qui limite la biomasse et le rendement de la céréale associée.

En effet, **un rendement réduit de la céréale en culture associée entraîne une augmentation de la quantité d'azote disponible par grain, si et seulement si la quantité totale d'azote disponible pour la céréale associée n'est pas réduite par la légumineuse associée dans la même proportion, permettant ainsi d'avoir plus d'azote remobilisé par grain de céréale.**

Pour s'en convaincre, un calcul mathématique relativement simple permet de démontrer que :

$$\frac{N_{\text{min}}_{\text{Cereal-Associée}}}{\text{Yield}_{\text{Cereal-Associée}}} > \frac{N_{\text{min}}_{\text{Cereal-Pure}}}{\text{Yield}_{\text{Cereal-Pure}}} \Leftrightarrow N_{\text{min}}_{\text{Cereal-Pure}} \times \left(1 - \frac{\text{Yield}_{\text{Cereal-Associée}}}{\text{Yield}_{\text{Cereal-Pure}}}\right) > N_{\text{dfsoil}}_{\text{Legume-Associée}}$$

Avec en moyenne pour toutes les données disponibles ( $N = 58$ )  $\text{Yield}_{\text{Cereal-Pure}} = 0,29 \text{ kg m}^{-2}$ ,  $\text{Yield}_{\text{Cereal-Associée}} = 0,20 \text{ kg m}^{-2}$  et  $N_{\text{min}}_{\text{Cereal-Pure}} = 10,7 \text{ g N m}^{-2}$  ( $6,3 \text{ g N m}^{-2}$  accumulés par la céréale pure auxquels on doit ajouter les  $4,4 \text{ g N m}^{-2}$  correspondant au reliquat azoté à la récolte) et où  $N_{\text{dfsoil}}_{\text{Legume-Associée}}$  est la quantité d'azote minéral du sol acquise par la légumineuse en association.

Dès lors, sur la base de nos données, on peut calculer que **la quantité d'azote disponible par grain, ou masse de grains de céréale produite, en association est supérieure à celle en culture pure, si la quantité d'azote minéral du sol acquise par la légumineuse associée est inférieure à  $3,3 \text{ g N m}^{-2}$** . Or, dans nos expériences seulement 27% de l'azote acquis par la légumineuse associée dans les parties aériennes

provient du sol (**Figure 27**) ce qui ne représente en moyenne que  $2,9 \text{ g N m}^{-2}$ .

Cependant, ce processus ne pourrait être qu'une partie de l'explication. En effet, plusieurs auteurs, utilisant des méthodes de marquage  $^{15}\text{N}$  et des techniques de compartimentation racinaire ont montré que **la légumineuse pouvait faciliter l'acquisition de l'azote des céréales à travers des transferts d'azote directs ou indirects de la légumineuse vers la céréale** (Stern 1993 ; Xiao et al. 2004 ; Chalk et al. 2014). Des transferts indirects se produiraient **à travers la décomposition d'une partie des organes des plantes et en premier lieu des racines** (Johansen et Jensen 1996b ; Fustec et al. 2010) ainsi que par la production d'exsudats riches en azote sous la forme de  $\text{NH}_4^+$  (Brophy et Reichel 1989),  $\text{NO}_3^-$  (Wacquand et al. 1989) et d'acides aminés (Paynel et al. 2001 ; Lesuffleur et al. 2013).

Ces dépôts racinaires, peuvent représenter jusqu'à 30% de la quantité d'azote acquise par une plante de pois (Mahieu 2007) et pourraient être utilisés par la céréale associée ou par la légumineuse elle-même soit directement, soit après minéralisation par la biomasse microbienne du sol (Fustec et al. 2010). **Ce processus contribuerait ainsi à fournir jusqu'à 50% de l'azote acquis par la céréale dans les systèmes prairiaux** de ray-grass et de trèfle blanc (Hogh-Jensen et Schjoerring 2001). À l'inverse, **dans les cultures annuelles d'orge-pois, ces transferts représenteraient une plus faible proportion de l'azote acquis par la céréale** de l'ordre de 19% au maximum selon une expérimentation réalisée au Danemark (Jensen 1996b). Ceci s'explique par le fait que tous les composés organiques n'ont pas le temps d'être minéralisés pendant le cycle de culture et donc ne sont pas totalement disponibles pour la céréale.

## CHAPITRE 4 : PROCESSUS EXPLICATIFS DES PERFORMANCES DES ASSOCIATIONS

De plus, **la quantité d'azote échangée entre les plantes, et ce dans les deux sens (de la légumineuse vers la céréale et réciproquement), est d'autant plus élevée que la disponibilité en azote minéral du sol est faible.** Ces échanges semblent très faibles et sont alors négligeables dans les systèmes fertilisés. Par ailleurs, ces échanges augmentent lorsque les racines sont entremêlées (Jensen 1996a ; Xiao et al. 2004 ; Fustec et al. 2014). Au final, le bilan des transferts d'azote pendant la période de croissance des cultures associées annuelles, correspond à un **transfert net d'azote de la légumineuse vers la céréale associée faible, voire négligeable, du fait qu'un processus similaire se produit de la céréale vers la légumineuse** (Fustec et al. 2014).

La deuxième hypothèse, qui n'exclut pas la première, repose sur **un meilleur ajustement de la disponibilité en azote aux besoins de la céréale selon ses stades de développement et son potentiel de rendement.** Dans ce cas, seule une modification de la disponibilité en azote à un stade où les besoins de la culture sont élevés pourrait réduire la carence en azote des céréales associées par rapport aux cultures pures. Dans ce cas la concentration en protéines et le rendement relatif seraient améliorés notamment du fait d'une plus grande quantité d'azote remobilisée par grain de céréale en phase de remplissage.

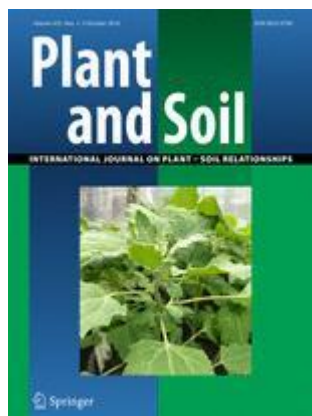
Ceci renforce la conclusion selon laquelle **l'effet de la culture associée est faible ou absent lorsque la disponibilité en azote minéral du sol est élevée car dans ces conditions la remobilisation d'azote dans le grain n'est pas ou peu limitante.** *A contrario*, la culture associée est particulièrement intéressante dans les systèmes à faible disponibilité en azote, où la complémentarité de niche entre fixation symbiotique du N<sub>2</sub> et absorption d'azote minéral du sol par les deux

espèces est exacerbée. Enfin, ces conditions permettent un meilleur ajustement de la disponibilité en azote aux besoins de la céréale permettant d'accroître la croissance (Fujita et al. 1992 ; Hauggaard-Nielsen et al. 2001ab ; Corre-Hellou et al. 2006 ; Naudin et al. 2010 ; Hauggaard-Nielsen et al. 2003).

Notons qu'il peut être difficile d'augmenter spécifiquement la teneur en protéines des céréales y compris en culture pure avec des apports importants d'engrais azotés. En effet, l'apport d'azote permet d'abord d'augmenter la production de matière sèche mais la quantité d'azote supplémentaire acquise se retrouve diluée dans la biomasse améliorant le rendement en grains mais sans nécessairement un effet sur la teneur en protéines (Lemaire et Gastal 1997). Or, **dans les cultures associées, la disponibilité en azote pour la céréale est accrue mais la compétition exercée par la légumineuse pour d'autres ressources permet de brider la production de biomasse et donc le rendement de la céréale. Ceci explique pourquoi *in fine* il se produit quasi systématiquement une augmentation relativement importante de la teneur en protéines des grains de céréale en culture associée avec une légumineuse.**

Ainsi, **cette amélioration de la teneur en protéines des grains de céréales en culture associée est particulièrement observable dans les situations où la teneur en protéines de la culture pure est limitée par le manque d'azote disponible.** Cette question a été traitée dans un article publié en 2010 par Bedoussac et Justes dans *Plant and Soil* 330:19-35 (**Encadré 7**).

Encadré 7 Résumé de l'article publié en 2010 dans Plant and Soil 330:19-35 visant à évaluer l'effet de la disponibilité en azote sur la performance des cultures associées blé dur-pois d'hiver en termes de rendement et de teneur en protéines.



## The efficiency of a durum wheat-winter pea intercrop to improve yield and wheat grain protein concentration depends on N availability during early growth

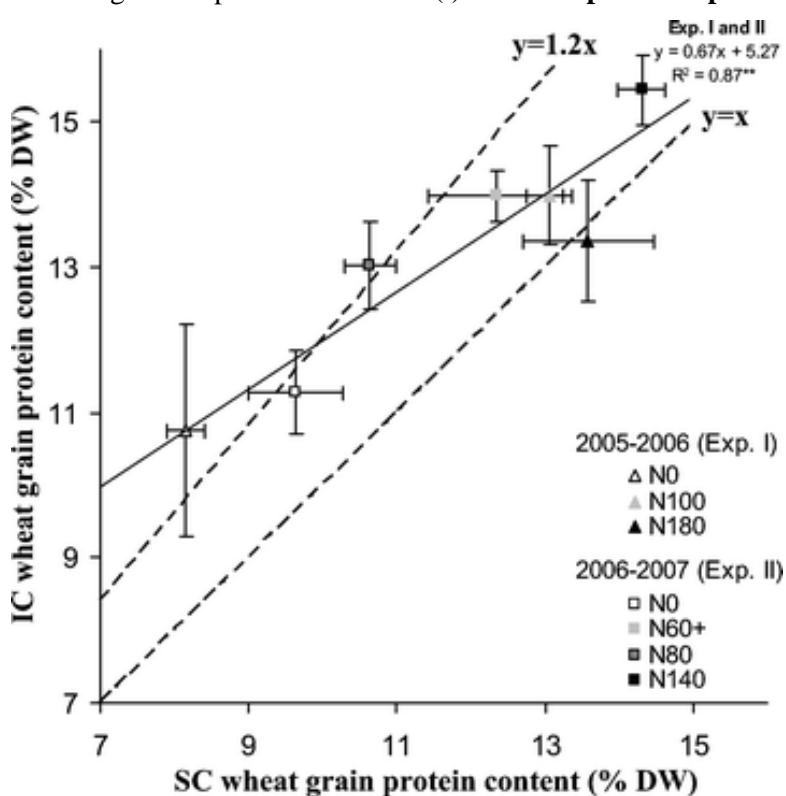
Laurent Bedoussac, Éric Justes

La concentration en protéines des grains de blé dur est souvent trop faible, en particulier dans les systèmes à bas niveau d'azote. **Le but de notre étude était d'évaluer si la culture associée blé dur-pois d'hiver permettait d'améliorer le rendement et la concentration en protéines du blé en situation de faible apport d'azote.**

Une expérience de deux ans a été réalisée dans le sud-ouest de la France avec différents niveaux d'engrais azotés pour comparer le blé dur (*Triticum turgidum* L., cv. Nefer) et le pois d'hiver (*Pisum sativum* L., cv. Lucy) en cultures pures et en culture associée substitutive en ligne.

Sans fertilisation azotée ou lors d'un apport tardif (N disponible jusqu'à la floraison de la céréale de moins de 120 kg N ha<sup>-1</sup>) **la culture associée est jusqu'à 19% plus efficace que les cultures pures en terme de rendement et jusqu'à 32% pour l'azote accumulé** mais elle est moins efficace avec des quantités d'azote supérieures.

**La concentration en protéines des grains du blé dur a été significativement plus élevée dans les cultures associées que dans les cultures pures (+14% en moyenne, Figure 33)** illustrant une quantité d'azote remobilisée dans les grains supérieur du fait de : (i) **moins d'épis de blé par mètre carré en culture associée** et (ii) **une quantité**



**d'azote disponible pour la céréale similaire en association et en culture pure** en raison du taux de fixation de N<sub>2</sub> de 88% par le pois dans les cultures associées contre 58% en cultures pures.

Figure 33 Relation entre la concentration en protéines du blé dur (% du poids sec) en culture associée (IC) en fonction de celle en culture pure (SC) pour différents niveaux de fertilisation azoté (Nx où 'x' représente la quantité d'azote minéral apportée en kg N ha<sup>-1</sup>) pour deux expérimentations. La régression linéaire a été obtenue en incluant tous les traitements. (\*\*) indique que la régression linéaire est significative à P = 0,01. Les valeurs sont les moyennes de n = 3 à 5 ± erreur standard. La première bissectrice y = x et la régression y = 1.2\*x sont indiquées afin d'illustrer l'augmentation de la concentration en protéines des grains en association par rapport à la culture pure.

### 8. Analyse du fonctionnement dynamique

Les interactions entre espèces sont complexes, et leur intensité évolue au cours du temps. Elles dépendent entre autres de la disponibilité en éléments nutritifs et des facteurs environnementaux (Connolly et al. 1990). Ainsi, **les études portant sur les compétitions en culture associée ne peuvent pas s'appuyer sur des données provenant d'une seule récolte faite à maturité** ni sur un seul un niveau de fertilisation azotée ou un seul contexte pédoclimatique.

Différents auteurs ont montré que **les mesures séquentielles de la croissance des plantes permettent une meilleure compréhension de la dynamique et des mécanismes des interactions compétitives** en culture associée et en culture pure par rapport à une seule mesure du rendement final (Connolly et al. 1990).

Sur la base d'une expérimentation conduite en 2005 et 2006 avec différents niveaux de fertilisation minérale nous avons réalisé plusieurs échantillonnages à des stades de développement clés pour analyser la dynamique des compétitions inter- et intraspécifiques dans des associations blé dur-pois d'hiver. Une partie des résultats a été présentée précédemment (**Encadré 6**) montrant que l'efficacité des cultures associées et la compétitivité interspécifique des cultures dépend de la dynamique de disponibilité de l'azote tout au long du cycle de croissance.

Bien que l'analyse dynamique de la croissance des plantes soit d'un grand intérêt pour comprendre la mise en place des compétitions inter- et intraspécifiques il n'en reste pas moins que **ces mesures sont coûteuses et chronophages**. C'est pour cette raison que nous avons **proposé une méthode alternative simple basée sur l'analyse des composantes du rendement à la récolte qui sont faciles à mesurer et intuitives**

(Sadras et Slafer 2012). Cette idée est étayée par le fait que les composantes se mettent en place progressivement au cours du cycle cultural, et donc sont susceptibles d'informer sur la dynamique des interactions au cours du cycle cultural de l'association. Cette question a fait l'objet d'un article soumis à Field Crop Research (**Encadré 8**) et actuellement en révision sous le titre : « **A method based on yield component analysis to assess intraspecific and interspecific plant-plant interactions in intercrops** ».

### 9. Conclusion et perspectives

Ce chapitre visait à analyser les processus explicatifs des performances des associations **notamment en termes de rendement final et de teneur en protéines des céréales**. Nous avons contribué, avec d'autres collègues, à démontrer que les cultures associées utilisaient les ressources disponibles plus efficacement que les cultures pures, lorsqu'elles sont utilisées en conditions de faible disponibilité en azote et en Agriculture Biologique.

Dans ces conditions les cultures associées produisent plus de biomasse et des rendements supérieurs que la moyenne des cultures pures et cette efficacité est déterminée par la complémentarité de niche pour l'acquisition d'azote. Par ailleurs, indépendamment de la disponibilité en azote, **la céréale bénéficie plus de la culture associée que la légumineuse du fait d'une meilleure utilisation de l'azote minéral du sol, de la lumière et de l'eau tout au long du cycle**. Ces résultats s'expliquent par une croissance plus précoce, une hauteur plus élevée malgré une demande en azote plus importante. Aussi, **cet avantage est amplifié avec l'accroissement de la disponibilité en azote au détriment de la légumineuse** (Fujita et al. 1992 ; Jensen 1996a ; Bulson et al. 1997).

Encadré 8 Résumé de l'article soumis à Field Crop Research en 2018 actuellement en révision portant sur le développement d'une méthode basée sur l'analyse des composantes du rendement pour évaluer la dynamique des compétitions inter- et intraspécifiques.



## A method based on yield component analysis to assess intraspecific and interspecific plant-plant interactions in intercrops [under review]

Laurent Bedoussac, Etienne-Pascal Journet, Éric Justes

**Le but de cette étude était de développer une méthode originale et simple basée sur les composantes du rendement** pour : (i) analyser les interactions inter- et intraspécifiques, (ii) quantifier leur niveau d'intensité, (iii) déterminer les stades clés de leur établissement et (iv) évaluer leurs conséquences sur la formation du rendement. **L'hypothèse étant que les composantes, qui s'établissent à des stades de développement spécifiques, permettent de déduire, à partir d'échantillons collectés à la maturité, la dynamique et l'intensité des interactions entre espèces (Figure 34).**

Nos résultats montrent que : (i) **les interactions intraspécifiques ont lieu tôt dans le cycle** affectant principalement le nombre de talles par plante (-17%) et le nombre d'épis par plante (-15%) tandis que (ii) **les interactions interspécifiques se mettent en place plus tardivement** réduisant le nombre d'épis par plante (-14 %) et sans effet sur le nombre de talles par plante (-2%). Le nombre de grains par épis, a également été réduit par des interactions inter- et intraspécifiques (-9% et -20% respectivement), tandis que le poids individuel des grains n'a pas été affecté. De plus, **les interactions intraspécifiques étaient généralement plus intenses que les interactions interspécifiques. La méthode a permis aussi de quantifier la réponse du blé à la compétition du pois dont nous montrons qu'elle dépend de la disponibilité en azote et des caractéristiques du cultivar de blé.**

Nous démontrons dans cette publication « under review » que cette approche est pertinente pour comprendre la dynamique des interactions. Nous présumons qu'elle sera utile pour concevoir des cultures associées complémentaires et performantes, notamment pour : (i) **les sélectionneurs**, qui ont l'habitude de mesurer les composantes du rendement pour évaluer les ressources génétiques, afin de déterminer les caractéristiques des cultivars adaptées et pour (ii) **les agronomes**, afin d'adapter la conduite en fonction de l'intensité des compétitions

en interaction avec le niveau de disponibilité en azote.

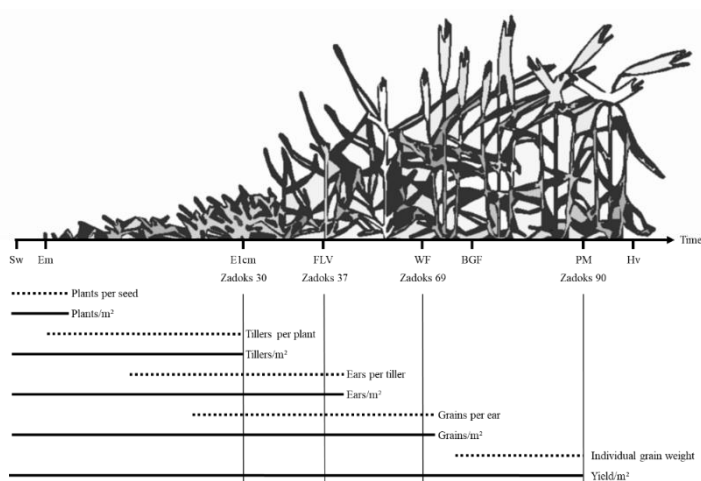


Figure 34 Croissance du blé et établissement des composantes du rendement. Les lignes pointillées indiquent les périodes de différenciation ou de croissance des composantes du rendement du blé (plantes par graine, talles par plante, épis par talle, grains par épi et poids individuel des grains). Les lignes pleines indiquent des périodes de différenciation ou de croissance des composantes cumulées par m<sup>2</sup> (plantes m<sup>2</sup>, talles m<sup>2</sup>, épis m<sup>2</sup>, grains m<sup>2</sup> et rendement m<sup>2</sup>). Adapté de Slafer et Rawson (1994).

## CHAPITRE 4 : PROCESSUS EXPLICATIFS DES PERFORMANCES DES ASSOCIATIONS

A l'inverse, les légumineuses exercent une compétitivité interspécifique accrue dans les situations à faible disponibilité en azote qui limitent la croissance de la céréale mais qui n'affecte pas le fonctionnement de la fixation du N<sub>2</sub> (Voisin et al. 2002 ; Ghaley et al. 2005) puisque le taux de fixation est généralement supérieur en culture associée.

Nos résultats suggèrent que **la productivité des cultures associées peut être optimisée en adaptant la fertilisation azotée, mais aussi en choisissant des espèces et variétés ayant des phénologies et des morphologies complémentaires.** Pour ce faire la construction de l'assemblage des deux espèces doit permettre, d'une part, de maximiser la capture des ressources disponibles et, d'autre part, de minimiser la concurrence entre les espèces, notamment pour l'acquisition du rayonnement lumineux. En particulier, il faut éviter un effet négatif trop fort sur la croissance des légumineuses qui détermine fortement la performance finale des cultures associées.

**A l'issue de ce bilan, il convient de souligner que des recherches complémentaires sont nécessaires pour étudier l'effet des cultivars sur la dynamique des interactions interspécifiques** en tenant compte : (i) des densités, (ii) des dates de semis et (iii) du niveau de fertilisation azotée. Enfin **l'optimisation de la conduite des associations doit tenir compte des objectifs spécifiques visés par les agriculteurs** comme le choix de : (i) la production de céréales, (ii) l'augmentation de la concentration en protéines, (iii) l'optimisation de l'azote disponible ou encore (iv) la moindre utilisation de produits phytosanitaires...

Cela montre les **limites des expérimentations au champ et l'intérêt de la modélisation** des systèmes multi-espèces (Brisson et al. 2004 ; Corre-Hellou et al.

2009 ; Launay et al. 2009). En effet, la modélisation permettrait : (i) d'évaluer la performance et le comportement des cultures associées dans un large éventail de conditions, (ii) d'aider à la détermination des caractéristiques variétales adaptées à la culture associée (Barillot et al. 2012 ; Barillot et al. 2014ab), (iii) d'optimiser, par simulation de plan expérimental ou mathématiquement, les itinéraires techniques d'un point de vue multicritères et (iv) d'élaborer un modèle d'aide à la décision.

Cependant, cela **nécessite une meilleure compréhension du fonctionnement des systèmes multi-espèces et leur intégration dans les modèles de culture** actuels ou le développement de nouveaux modèles pour représenter correctement les compétitions inter- et intraspécifique (Launay et al. 2009) et il pourrait être pertinent **d'établir des liens avec d'autres systèmes pluri-spécifiques comme les prairies ou l'agroforesterie afin de créer des modèles génériques de couverts multi-espèces.**



# CHAPITRE 5 : PROJET DE RECHERCHE CO-CONCEPTION D'ITINERAIRES TECHNIQUES DE CULTURES ASSOCIEES POUR ACCROITRE ET STABILISER LA PRODUCTION ET LA QUALITE NUTRITIONNELLE EN VUE DE LEUR INTEGRATION DANS LES SYSTEMES DE CULTURES ET LES FILIERES

## Plan du chapitre

Résumé du chapitre	80
1. Un système agricole verrouillé, peu favorable aux associations, malgré leurs intérêts agronomiques	81
1.1. Un système agricole verrouillé	81
1.2. Une organisation logistique des coopératives a priori compatible	81
1.3. La nécessité d'une coordination entre acteurs	82
1.4. Co-conception multi-acteurs et traque aux innovations : des outils pour le développement des cultures associées	83
2. Axe 1 : Traque aux innovations, co-conception et machinisme agricole	85
2.1. Hypothèse 1 : traque et co-conception, des sources d'innovations produisant des questions de recherche	85
Démarche proposée pour la traque aux innovations et la co-conception	87
2.2. Hypothèse 2 : la performance économique dépend de l'optimisation conjointe de la récolte et du tri	87
Démarche proposée pour optimiser conjointement la récolte et le tri des graines	90
3. Axe 2 du projet de recherche : Accroître et stabiliser la production et la qualité nutritionnelle	91
3.1. Hypothèse 3 : les associations modifient la composition chimique des grains et leur qualité nutritionnelle	91
Démarche proposée pour l'analyse de la composition chimique des grains et de leur qualité nutritionnelle	92
3.2. Hypothèse 4 : les associations stabilisent la production face aux aléas	93
Démarche proposée pour évaluer la stabilité de la production face aux aléas	95
3.3. La modélisation pour aider à la conception d'itinéraires techniques et au criblage de variétés adaptées	98
Démarche proposée pour utiliser la modélisation pour concevoir des itinéraires techniques et cribler des variétés	99
4. Conclusion	100



Résumé du chapitre

Mon projet de recherche (Figure 35) se décompose en deux axes qui contribueront à la **conception de systèmes de culture agroécologiques** et à la **sécurisation de la production** notamment de légumineuses à graines :

- **Axe 1 : traque aux innovations et co-conception d'itinéraires techniques avec les acteurs des filières.** Cet axe vise à étudier comment favoriser l'adoption à large échelle des cultures associées par les agriculteurs et par les différents acteurs dont des entreprises spécialisées dans le machinisme agricole (récolte et tri post-récolte) en accordant une place centrale à la question de leur valorisation économique.
- **Axe 2 : effet des associations sur l'accroissement et la stabilisation de la production et l'amélioration de la qualité nutritionnelle des graines.** En prolongeant nos travaux sur l'analyse du fonctionnement et de la performance des associations et en développant des collaborations, cet axe contribuera à réduire l'incomplétude des connaissances notamment sur le contrôle des bioagresseurs, mais aussi sur le criblage de variétés adaptées.

**Co-conception d'itinéraires techniques de cultures associées pour accroître et stabiliser la production et la qualité nutritionnelle en vue de leur intégration dans les systèmes de culture et les filières**

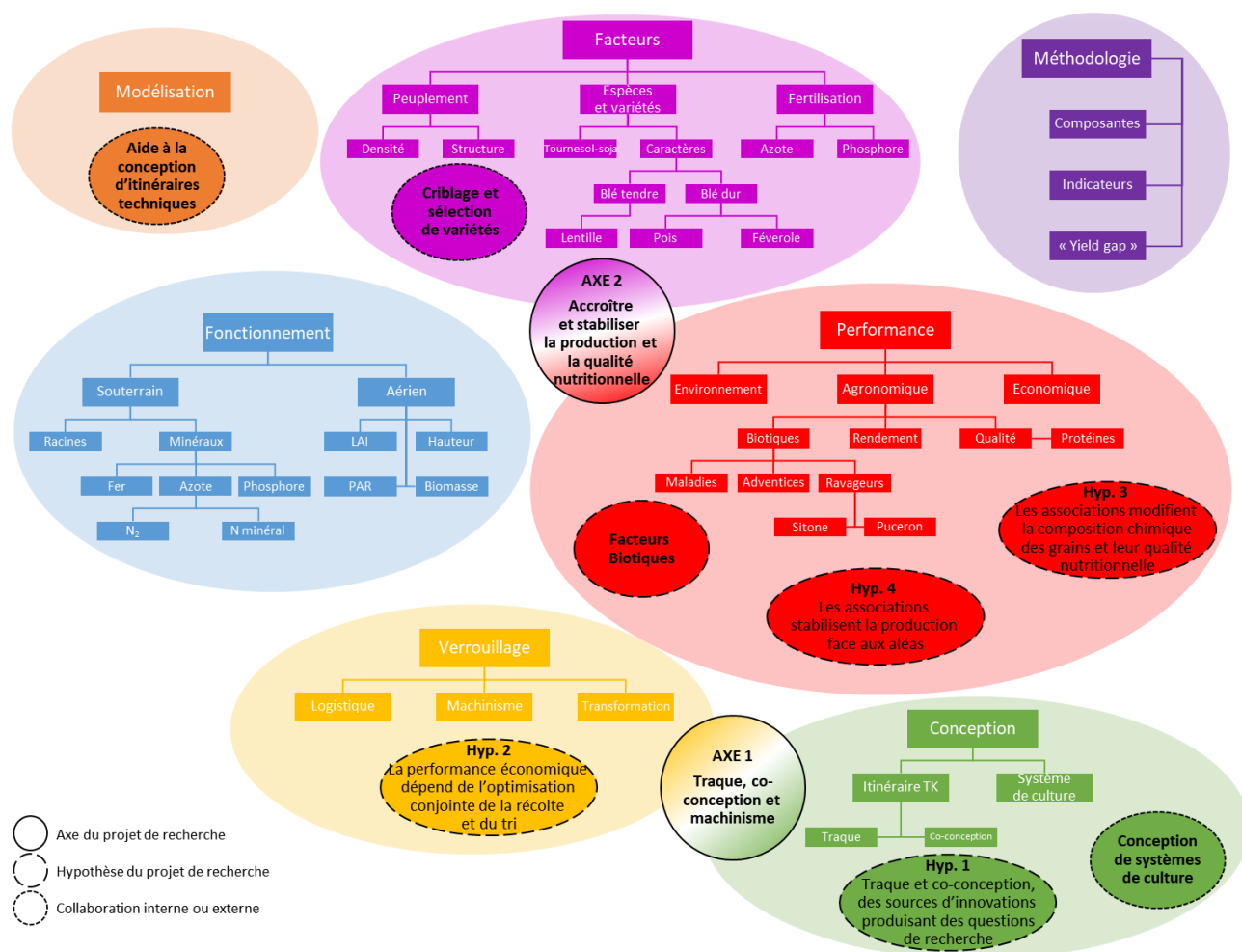


Figure 35 Représentation schématique de mon projet de recherche : axes, hypothèses et collaborations.

### 1. Un système agricole verrouillé, peu favorable aux associations, malgré leurs intérêts agronomiques

#### 1.1. Un système agricole verrouillé

La conception de systèmes de culture impose de fixer un cadre d'objectifs et de contraintes qui peuvent être aussi bien de nature pédoclimatique, technique que socio-économique (Loyce et Wery 2006). En effet, le choix des systèmes de culture et des espèces cultivées sur une ferme est principalement influencé par trois facteurs interdépendants que sont : (i) les motivations des agriculteurs, (ii) les conditions pédoclimatiques et (iii) le contexte local à travers les filières existantes. **L'ensemble de ces contraintes détermine la souplesse des systèmes à l'introduction de nouvelles cultures à l'échelle de la ferme** et, par effet induit, à l'échelle du territoire et du collecteur.

Or, on observe que l'agriculture contemporaine tend à être marquée par **une faible diversité biologique cultivée du fait de la spécialisation croissante des systèmes agricoles** (Schott et al. 2010) au sein de grands bassins de production. Les conséquences de cette spécialisation se mesurent également dans l'organisation des filières et plus particulièrement des organismes de collecte et de stockage. En effet, on observe une **optimisation de leur logistique en fonction de quelques productions dominantes et standardisées** (Meynard et al. 2013).

Cette optimisation s'explique par un ensemble de mécanismes économiques, dits « d'auto-renforcement » qui ont progressivement **conduits les acteurs des filières agro-industrielles à mutuellement consolider les avantages initiaux de ce paradigme fondé sur la spécialisation** (Fares et al. 2012). Ainsi, les économies d'échelles, l'amortissement de matériel, les infrastructures et les

compétences existantes tendent à bloquer ou à ralentir le développement de pratiques alternatives au système conventionnel (Geels 2011).

**Le système agro-industriel apparaît alors comme verrouillé en faveur de ce paradigme conventionnel lié à l'organisation de ce secteur issue de la « green révolution » post seconde guerre mondiale.** La moindre diffusion de pratiques alternatives comme les cultures associées (Crews et Peoples 2004) peut donc s'expliquer en partie par leur intérêt limité dans les systèmes à haut niveau d'intrants ainsi que par **des difficultés d'adaptation des acteurs le long des filières** (techniciens, coopératives, transformateurs...).

Dès lors, la co-conception de systèmes de culture incluant des associations nécessite : (i) d'optimiser les itinéraires techniques de ces dernières, (ii) d'analyser les rotations existantes afin d'identifier les contraintes des systèmes en place, (iii) d'évaluer d'un point de vue multicritères les conséquences à moyen et long terme et notamment vis-à-vis des facteurs biotiques et abiotiques en interaction avec l'environnement et (iv) de prendre en compte les contraintes propres aux différents acteurs des filières.

#### 1.2. Une organisation logistique des coopératives a priori compatible

**Parmi les freins au développement des cultures associées, la question de leurs débouchés est déterminante** pour la production de graines destinées à l'alimentation animale aussi bien qu'à l'alimentation humaine. Les coopératives et plus largement les négociants et organismes de collecte et stockage occupent une place centrale à l'interface entre producteurs et transformateurs. Il est donc essentiel **d'analyser leur structure technico-organisationnelle au regard de leur logistique afin d'évaluer certaines**

**formes d'adaptabilité** vis-à-vis de la gestion des produits agricoles issus de pratiques agronomiques alternatives. Une telle analyse pourrait constituer un **point d'amorçage pour un changement de paradigme global de la filière vers des logiques plus économes en intrants** fondées notamment sur une plus grande diversité cultivée.

**La mise en œuvre des associations d'espèces par les agriculteurs peut avoir des impacts sur les organismes de collecte et de stockage** s'il revient à ces derniers de séparer les graines avant de les livrer à des transformateurs, qui ont des exigences de qualité fortes (pas de mélange de graines d'espèces, taux d'impuretés très bas, gamme stricte de teneur en protéines, qualité sanitaire...). Dans ce cas **le principal verrou vient du fait que les cultures associées doivent être triées**, ce qui peut être coûteux, nécessitant d'investir dans des outils de triage ou dans des capacités de stockage plus importantes (Magrini et al. 2013) mais également en étant susceptible d'affecter leur organisation logistique.

Nous proposons donc de revenir ici sur les conséquences que pourraient avoir l'introduction des associations à l'échelle de l'organisation logistique de coopératives agricoles. Pour cela nous nous sommes basé sur **une enquête réalisée en 2010 auprès des 15 coopératives de Midi-Pyrénées collectant du blé dur** afin d'identifier quels sont les facteurs pouvant expliquer la capacité des acteurs à accepter ou non les cultures associées (**Encadré 3**).

Les résultats de cette étude ont montré que **sur les 15 coopératives interviewées, 11 d'entre elles déclarent leur logistique actuelle comme *a priori* compatible avec la collecte des cultures associées** et ceci indépendamment de leur taille et du ratio [volume de stockage / volume collecté]. Ce résultat est plutôt

surprenant et s'explique par le fait que **les grands principes d'organisation restent les mêmes (collecte, stockage avant tri, tri, stockage post-tri)** et ne nécessitent pas nécessairement d'investissement dans du matériel spécifique. En effet, les moyens matériels sont déjà adaptés aux pratiques et aux cultures régionales dominantes. En particulier les outils de tri des graines pour avoir la qualité recherchée par les transformateurs, obligent les coopératives à trier les graines des cultures pures classiques pour maximiser le prix de vente et avoir accès aux divers marchés.

Il ressort de cette étude que **la capacité des coopératives à gérer des lots issus de cultures associées dépend des capacités de stockage et de segmentation permettant de gérer la qualité et la diversité**. Or, la logistique est « un gisement de différenciation et globalement d'efficacité économique et donc de compétitivité dans un monde hautement concurrentiel » d'après Mathé et Tixier (2010). Ainsi, **la structure technico-organisationnelle de ces coopératives donnerait à ces structures une « avance » sur les autres** pour anticiper et s'adapter à de nouvelles exigences sociétales. En effet, leur stratégie, orientée sur la gestion de la qualité et de la diversité, leur permet de collecter une plus grande diversité de produits (espèces et modes de production).

### 1.3. La nécessité d'une coordination entre acteurs

**Dans le cas des cultures associées, la gestion de la qualité dépend de la capacité à trier efficacement les lots. Or la majorité des agriculteurs ne sont pas équipés des outils nécessaires et c'est donc la coopérative qui doit assumer les contraintes liées au tri et au stockage** en s'assurant de la rentabilité d'une telle opération au regard : (i) de la valorisation escomptée, (ii) des adaptations dans le matériel existant

et dans certains cas (iii) de l'acquisition d'un matériel adapté.

**Du point de vue du collecteur, au-delà de la faisabilité de réaliser un tri de qualité à un coût acceptable, se pose la question des contraintes logistiques et des coûts supplémentaires** en termes de : (i) **disponibilité de la main d'œuvre** pour traiter de façon particulière des lots en période de pointe d'activités et (ii) **besoins supplémentaires en capacité de stockage** puisqu'en plus des cellules de stockage pour la céréale et la légumineuse il faut également prévoir une cellule pour l'association avant la réalisation du tri. Une alternative consisterait à réaliser une opération de pré-tri dès la récolte ce qui semble difficilement compatible avec la pointe de travail des agriculteurs et des coopératives à cette période.

Par ailleurs, **la collecte de produits non homogènes comme les cultures associées conduirait à ajuster les méthodes d'échantillonnage et d'analyse** à l'arrivée des lots à la coopérative pour en évaluer la qualité et la composition en vue du paiement à l'agriculteur (Bousseau 2009).

Tous ces éléments mettent en évidence que **la question du tri est un élément déterminant qu'il convient de prendre en compte pour que les coopératives et plus largement les acteurs aval soient en mesure d'accepter la collecte à large échelle des cultures associées**. Le développement des associations d'espèces nécessite *a minima* une coordination entre ces deux maillons clés de la filière que sont : (i) les agriculteurs en adaptant le choix des espèces et des variétés (taille des graines, facilité de battage) et les réglages de la moissonneuse batteuse pour limiter la casse des grains qui rend le tri délicat et (ii) les coopératives à travers le choix des équipements de tri et de leurs réglages et en optimisant leur

logistique. Le développement des associations d'espèces nécessite également **des innovations technologiques dans le machinisme agricole et dans les technologies de tri pour contribuer à faciliter l'adoption des cultures associées**.

**Enfin, des incitations financières pourraient contribuer à soutenir le développement des cultures associées, tout particulièrement dans la phase d'apprentissage de ces pratiques par les agriculteurs et les coopératives**. A ce titre il est intéressant de noter l'existence de freins d'ordre réglementaire comme dans le cas des aides de la Politique Agricole Commune qui : (i) ne valorisent pas les associations d'espèces au travers par exemple de mesures agro-environnementales ou encore (ii) ne permettent pas aux cultures associées de bénéficier de l'aide protéagineux du fait que la céréale est souvent l'espèce majoritaire (la notion de « majoritaire » étant définie dans ces textes sur la base de la densité de grains semés).

### 1.4. Co-conception multi-acteurs et traque aux innovations : des outils pour le développement des cultures associées

Les éléments précédents montrent que **le développement des cultures associées ne peut se faire sans le consentement et la collaboration de tous les acteurs des filières**. En effet, les freins au développement des cultures associées sont de différentes natures et portés par différents acteurs de la filière : (i) **les agriculteurs** ont besoin d'un soutien technique s'ils n'ont pas le savoir-faire, (ii) **les organismes stockeurs et collecteurs** doivent adapter leurs équipements de collecte, de tri et de stockage pour satisfaire les exigences de qualité des transformateurs, (iii) **les agro-industriels** doivent adapter la transformation des aliments si les propriétés

## CHAPITRE 5 : PROJET DE RECHERCHE

technologiques des grains sont affectées, **(iv) les sélectionneurs** doivent concevoir des variétés adaptées, **(v) les instituts techniques** doivent acquérir et transférer des connaissances opérationnelles, **(vi) les chercheurs agronomes** doivent produire des connaissances sur les performances et les mécanismes de fonctionnement des cultures associées, **(vii) les autorités nationales et européennes** doivent envisager des politiques pertinentes pour favoriser le développement de cette pratique et **(viii) les consommateurs** doivent définir leurs besoins et modifier leurs habitudes.

Le développement de cette pratique nécessite donc de **prendre en considération tous ces acteurs et surtout nécessite une coordination efficace** entre eux. Dès lors il est **nécessaire de développer de nouvelles approches pour renforcer la transférabilité des connaissances** sans pour autant exclure d'autres méthodes plus « classiques » comme l'expérimentation en station. Parmi, ces approches, **la mise en place d'une démarche de co-conception apparaît comme une piste prometteuse**. Pour cela il existe une diversité de méthodes qui visent notamment à créer des systèmes agricoles plus durables comme par exemple : (i) **DEED pour Describe Explain Explore Design cycle** (Falconnier et al. 2017), (ii) **DISCS pour the improved participatory re-design and assess innovative cropping systems** (Le Bellec et al. 2012), (iii) **DATE pour Diagnosis, Design, Assessment, Training and Extension** (Husson et al. 2015) ou encore (iv) le **Rami Fourrager**, un jeu sérieux pour adapter les systèmes fourragers à différents objectifs (Martin 2015).

L'intérêt principal de la co-conception participative, est qu'elle favorise l'acceptation et la mobilisation des objets conçus puisque ces derniers le

sont en réponse aux attentes des utilisateurs finaux qui sont impliqués dans le processus (Falconnier et al. 2017 ; Lefèvre et al. 2014). Pour cela, la co-conception participative doit : **(i) prendre en compte différents types de contraintes et opportunités des acteurs dont les intérêts peuvent être divergents et (ii) relier des connaissances de différentes natures pour concevoir des objets adaptés aux attentes des acteurs** (Meynard et al. 2012).

Parallèlement à la co-conception, **la traque aux innovations est une méthodologie intéressante ayant pour objectif de repérer des innovations techniques, systémiques ou organisationnelles conçues par des agriculteurs, d'en caractériser les performances économiques et environnementales et d'analyser les conditions d'expression de ces performances** (Meynard et al. 2012). Cette méthodologie peut être mise en œuvre selon cinq étapes (Salembier et al. 2016) : (i) caractérisation du système dominant, (ii) identification des producteurs développant des pratiques alternatives, (iii) description des systèmes alternatifs et de leurs logiques i.e. du lien entre les pratiques et les motivations lors du choix de ces pratiques, (iv) évaluation multicritères des systèmes alternatifs et (v) analyse des conditions de développement des systèmes les plus performants.

Au-delà de la description des espèces associées par les agriculteurs, **la traque aux innovations est une méthode efficace pour obtenir des références sur des pratiques alternatives développées par les agriculteurs** permettant d'identifier entre autres une diversité d'objectifs de production ainsi qu'une diversité d'itinéraires techniques mis en œuvre pour atteindre ces objectifs en termes de combinaisons d'espèces, de variétés, de densités, de structures de couvert et de stratégies de fertilisation (organique ou

minérale). Cette diversité tend à montrer que **les agriculteurs ont une capacité à explorer et tester par eux même des pratiques innovantes** du fait qu'ils sont amenés à faire évoluer leurs systèmes et à s'adapter aux changements en permanence (Goulet et al. 2008) et d'autres part que **les itinéraires techniques mis en œuvre sont adaptés à chaque agriculteur, objectif et contexte**.

## 2. Axe 1 : Traque aux innovations, co-conception et machinisme agricole

Je considère que mes travaux de recherche ont pris une nouvelle dimension avec mon implication dans le projet de recherche européen ReMIX « **Redesigning European cropping systems based on species MIXtures** » qui vise à concevoir des systèmes de culture durables et diversifiés en Europe, basés sur des associations céréales-légumineuses et qui **constitue le socle de départ de mon projet de recherche**.

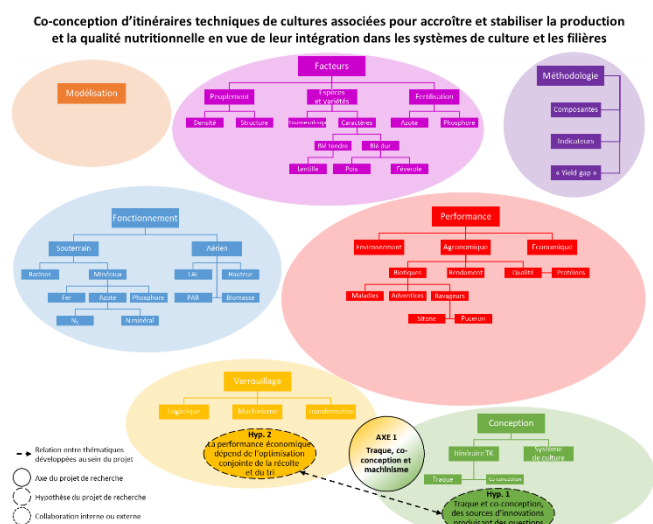


Figure 36 Positionnement dans la continuité des travaux précédents de l'axe 1 de mon projet de recherche et des deux hypothèses principales auxquelles cet axe cherchera à répondre (voir Figure 43 pour plus de détails).

En effet, dans le cadre de ce projet, **je coordonne la plateforme multi-acteurs du Sud-Ouest de la France** qui est l'une des 11 plateformes mise en place

à travers l'Europe. C'est donc pour moi **l'occasion de conduire des travaux de traque aux innovations et de co-conception avec les acteurs en s'intéressant notamment aux questions liées au machinisme agricole (récolte et tri)**. Ces éléments constituent l'axe 1 de mon projet de recherche (Figure 36).

### 2.1. Hypothèse 1 : traque et co-conception, des sources d'innovations produisant des questions de recherche

Pour ce faire, nous avons **réalisé en 2018 une enquête** auprès de 28 agriculteurs du Sud-Ouest de la France (principalement des céréaliers en agriculture biologique) qui nous a permis de recenser pas moins de 35 associations différentes (Figure 37). Ces résultats montrent que, dans un contexte agricole verrouillé et peu favorable au développement des cultures associées, **certains agriculteurs n'hésitent pourtant pas à cultiver des associations en utilisant une vaste gamme d'espèces dont les principales sont la féverole, le pois, la luzerne et la lentille** qui représentent réciproquement 27%, 26%, 12% et 11% des cas.

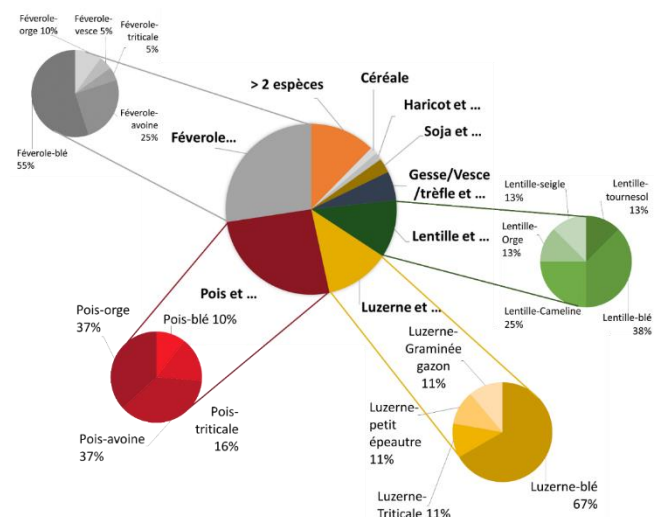


Figure 37 Illustration de la diversité de cultures associées pratiquées par 28 agriculteurs interviewés en amont des 4 ateliers de co-conception réalisés en 2018 dans le Sud-Ouest dans le projet ReMIX. Les cultures associées sont classées selon les principales espèces.

## CHAPITRE 5 : PROJET DE RECHERCHE

Cela nous amène à formuler une première **hypothèse selon laquelle l'analyse de cette diversité de pratiques des agriculteurs peut être à l'origine de résultats intéressants et originaux qui sont sources d'innovations (Petit et al. 2012) et que l'on se propose de valider scientifiquement.**

Toujours en 2018, nous avons également réalisé, avec une vingtaine d'agriculteurs, **une première série d'ateliers de co-conception, qui ont permis de faire émerger des pratiques alternatives et exploratoires** comme par exemple le semis d'association blé-lentille en hiver plutôt qu'au printemps pour éviter les stress hydriques de fin de cycle et réduire la pression des bruches.

**Ces ateliers ont également permis de faire émerger une diversité d'objectifs** et notamment la recherche d'un souplesse tactique consistant à concevoir des associations « s'adaptant aux conditions climatiques de l'année » comme par exemple : (i) une association semée pour la production de graines mais pouvant être fauchée de façon anticipée pour renforcer les stocks fourragers si besoin ou en cas de verse prononcée ne permettant pas de conduire la culture à son terme ou (ii) le choix de l'espèce à semer dans un couvert de blé qui est adapté en fonction du développement végétatif de la céréale (pois chiche pour l'alimentation humaine ou mélange de cultures intermédiaires multi-services).

Enfin **pour un objectif donné, ces ateliers ont conduit à des itinéraires techniques associés adaptés à chaque contexte.** A titre d'illustration, dans le cas des associations blé-féverole le semis a été envisagé de deux façons : (i) un passage de semoir à céréales permettant un semis rapide et sans matériel particulier ou (ii) un semis en deux fois (blé au combiné de semis associant une herse rotative et un semoir pneumatique

et féverole en semis direct) pour un meilleur contrôle des densités et des profondeurs.

**Ces ateliers ont aussi permis d'identifier un certain nombre de freins dont les principaux sont d'ordre techniques (Figure 38) liés au manque de références disponibles sur la conduite des associations et à l'absence de conseillers en capacité d'accompagner les agriculteurs dans la mise en œuvre de cette pratique innovante.**

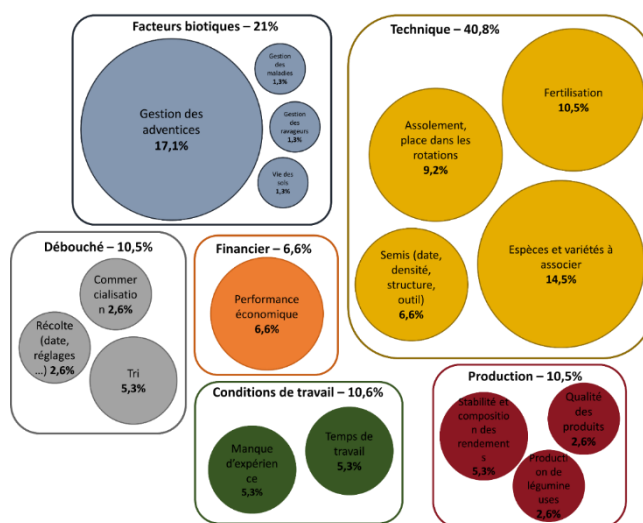


Figure 38 Thèmes identifiés comme des freins à la pratique des cultures associées par 28 agriculteurs lors d'ateliers de co-conception réalisés en 2018 dans le Sud-Ouest de la France. La taille des bulles est proportionnelle au nombre d'occurrences chaque agriculteur disposant de cinq votes.

Cela nous amène donc à formuler une seconde **hypothèse selon laquelle la traque aux innovations et la co-conception permettent d'identifier des verrous et de nouvelles questions de recherche pour y remédier.** Parmi les questions identifiées par les agriculteurs lors des ateliers de co-conception citons :

- **Quelles espèces et variétés à associer et plus largement quels itinéraires techniques ?**
- **Quel est l'effet des cultures associées sur les facteurs biotiques et en particulier sur la gestion des adventices en système biologique ?**

- **Quelles performances attendre des associations en terme de rendement, qualité et stabilité ?**
- **Comment récolter et trier les associations pour une valorisation économique satisfaisante ?**

Démarche proposée pour la traque aux innovations et la co-conception

**La traque aux innovations et les ateliers de co-conception menés en 2018 seront étendus dans les années à venir à d'autres agriculteurs et à différents acteurs du monde agricole du Sud-Ouest de la France afin de construire un panorama complet des pratiques et de faire émerger une diversité de cultures associées et d'itinéraires techniques associés acceptables** en fonction : (i) du mode de production (agriculture biologique vs agriculture conventionnelle), (ii) de la nature des exploitations (céréalières vs éleveurs), (iii) du mode de commercialisation (vente directe vs vente à des intermédiaires) ou encore (iv) du contexte pédoclimatique.

Concrètement, ce travail de traque et de mise en œuvre d'ateliers de co-conception sera réalisé dans un premier temps en 2019 avec l'appui d'un stage de 6 mois de master 2 faisant suite au stage de Coline Moreau réalisé en 2018. A l'issue de ce travail nous aurons constitué un groupe d'acteurs souhaitant s'investir durablement dans le développement des cultures associées, groupe qui je l'espère s'enrichira d'année en année. Dès lors, au moyen d'un questionnaire qui sera envoyé annuellement à chacun de ces acteurs, nous collecterons différentes informations concernant entre autres : (i) les itinéraires techniques mis en œuvre, (ii) les performances obtenues notamment en termes de rendement et de qualité et (iii) les difficultés rencontrées.

Ces informations donneront lieu à une synthèse et à une restitution annuelle auprès de ces acteurs afin : (i) de mutualiser les connaissances, (ii) d'extraire ce qui peut être générique et ce qui relève de la dynamique locale, (iii) de lever un certain nombre de verrous identifiés par les acteurs et (iv) d'identifier de nouvelles questions de recherche. Ces informations alimenteront mon projet de recherche dont la question centrale est : **« comment assembler des espèces et optimiser leur itinéraire technique en fonction d'objectifs définis ? »** en partant du constat qu'il est illusoire d'espérer proposer des itinéraires techniques génériques du fait de la diversité des associations pratiquées et envisageables. **Par ailleurs, les données acquises pourront faire l'objet de publications scientifiques** traitant par exemple de : (i) l'évolution des pratiques vis-à-vis des cultures associées par des agriculteurs engagés dans un processus de co-conception ou (ii) l'évaluation des performances des cultures associées et des leviers mobilisés dans un réseau d'acteurs.

### 2.2. Hypothèse 2 : la performance économique dépend de l'optimisation conjointe de la récolte et du tri

**La récolte et le tri figurent parmi les principaux verrous techniques évoqués** par les agriculteurs et les responsables des coopératives agricoles concernant les associations d'espèces. Cette question n'a à ce jour pas été suffisamment traitée de façon scientifique ni prise en compte pour l'optimisation des itinéraires techniques. Cela justifie d'en faire **un élément clé de mon projet de recherche** en proposant de tester, **en interaction entre avec les fabricants de matériel agricole**, un certain nombre d'hypothèses qui sont décrites ci-dessous.



## CHAPITRE 5 : PROJET DE RECHERCHE

La coopérative Terrena, a réalisé en 2010 une étude de la collecte de 158 tonnes d'associations céréale-légumineuse biologiques dont il ressort que **les lots triés présentent systématiquement trop de grains de protéagineux cassés dans le blé ne permettant pas une valorisation de la céréale en alimentation humaine.**

**Nous faisons donc l'hypothèse globale que la qualité et la faisabilité du tri dépend en grande partie de la présence de grains cassés qui sont liés aux espèces et variétés cultivées et aux conditions de récolte, le tout impactant la marge économique nette des cultures associées.** Il est donc nécessaire d'analyser et d'optimiser conjointement la récolte et le tri des graines post-récolte des associations afin d'identifier les paramètres influençant cette performance économique (pertes à la récolte, coût du tri et valeur marchande des graines triées) pour ensuite les modéliser et *in fine* produire un outil d'analyse et d'optimisation.

Cette problématique pourrait conduire à proposer un **concept étendu de la notion d'itinéraire technique** allant du semis jusqu'à la production de graines commercialisables. En attendant de trouver le terme adéquat, nous parlerons d'itinéraire technique « commercialisable » dont l'efficacité reposera sur des ajustements techniques liés : (i) au machinisme (matériels de récolte et de tri), (ii) au choix variétal, mais aussi (iii) à des paramètres organisationnels partagés entre agriculteurs et collecteurs.

**En premier lieu, nous faisons l'hypothèse que les réglages et le type de moissonneuse impactent la qualité de la récolte et par effet induit celle du tri.**

Agriculteurs et spécialistes du machinisme suggèrent que les moissonneuses batteuses équipées de

batteur/contre-batteur axiaux sont plus performantes que les moissonneuses batteuses coaxiales. Cet élément mérite d'être évalué mais quel que soit le matériel utilisé ce sont les réglages de la moissonneuse batteuse (vitesse de battage, écartement entre batteur et contre-batteur et intensité de la ventilation) qui déterminent la quantité de grains récoltés et la qualité de la récolte.

Or, les céréales et les légumineuses exigent des réglages souvent opposés du fait notamment de la taille de leurs graines si bien que les marges de manœuvre sont limitées. Néanmoins, il existe un optimum à atteindre visant à limiter la présence de grains cassés. Cet optimum nécessite de à rechercher des compromis en s'orientant plutôt vers des réglages qui limitent la casse de la légumineuse au risque de perdre une fraction de céréale du fait d'épis mal battus mais cela reste à être démontré.

**Nous faisons également l'hypothèse que la qualité de la récolte et du tri dépendent de façon antinomique de certaines caractéristiques des espèces et des variétés.**

Cette hypothèse suggère que des travaux sont nécessaires pour identifier et évaluer des espèces et variétés qui répondent à certaines exigences au moment du battage à la récolte comme par exemple : (i) des variétés de pois dont les graines présentent une bonne résistance à la séparation des deux cotylédons, (ii) des variétés de céréales faciles à battre i.e. dont la résistance à la séparation des graines des glumes est faible), (iii) des espèces et variétés dont la maturité est synchrone et (iv) des espèces et variétés dont la taille des grains est proche pour pouvoir être récoltées avec le même écartement entre batteur et contre-batteur.

A l'inverse, le tri sera facilité par des grains dont la taille et la forme divergent comme le soulignent les

## CHAPITRE 5 : PROJET DE RECHERCHE

fabricants de trieur ainsi que la coopérative qui a observé de meilleurs résultats de tri pour les mélanges blé-féverole comparativement aux mélanges blé-pois tout en constatant que les premiers étaient plus délicats à récolter que les seconds du fait de la différence de taille des graines.

Par conséquent, la conception d'assemblages d'espèces doit explicitement prendre en compte, dans le choix des espèces et variétés, les exigences au moment du battage à la récolte mais également lors du tri qui sera réalisé ensuite. Pour cela il est nécessaire d'exploiter les ressources génétiques disponibles tout en gardant à l'esprit que la taille des graines dépend également des conditions de culture.

**Enfin, nous faisons l'hypothèse que les conditions de succès du tri et son coût dépendent du matériel disponible, de l'opérateur et des caractéristiques des lots.**

Les agriculteurs qui cultivent massivement des cultures associées pour les commercialiser ont investi dans des outils de tri permettant selon eux : (i) de nettoyer et séparer efficacement les grains, (ii) d'en améliorer la conservation, et donc *in fine* (iii) de conserver une partie de la valeur ajoutée générée par les associations. A l'inverse, la plupart des opérateurs des coopératives s'accordent à dire qu'ils ne sont pas en mesure d'enlever les brisures de légumineuses dans la céréale à moins d'utiliser des outils sophistiqués comme des tables densimétriques ou des trieurs optiques. Or ces outils génèrent un coût de tri plus élevé pouvant être partiellement compensé par une réduction de la quantité de rebut par rapport à des trieurs conventionnels. D'ailleurs la coopérative Terrena a estimé que la quantité de protéagineux non valorisée, correspondant aux brisures ne pouvant pas être

séparées de la céréale, représentait une perte de l'ordre de 8 €/tonne.

Quoiqu'il en soit cette divergence de point de vue entre agriculteurs et coopératives nécessite d'être analysée car elle ne s'explique pas par la nature des trieurs utilisés. Une première hypothèse peut être que les exigences qualitatives ne sont pas exactement les mêmes en lien avec des débouchés différents. Une seconde hypothèse concerne des aspects logistiques en lien avec la capacité à adapter et choisir les réglages optimums pour un lot donné. En effet, un agriculteur est *a priori* plus à même d'adapter finement les réglages de ses outils en fonction de chaque lot qu'une coopérative qui gère des volumes beaucoup plus importants et qui dans certains cas doit se contenter de réglages « types ».

A défaut de pouvoir trier de façon totalement satisfaisante les cultures associées, deux pistes me semblent intéressantes à approfondir et à évaluer. La première consiste à **réaliser un allotement des grains issus de cultures associées préalablement triées avec des cultures pures**. Cette solution aurait pour objectif de diluer les impuretés à un niveau acceptable tout en relevant le taux de protéines des céréales pures. La seconde piste consiste à créer trois lots post-récolte : (i) la légumineuse, (ii) la céréale et (iii) la fraction non séparable qui serait vendue en alimentation animale. Cette proposition fait suite à des travaux préliminaires qui suggèrent qu'avec des outils classiques une fraction de chaque espèce est relativement aisée à séparer mais pas l'intégralité du mélange.

Trier à la ferme apparaît comme un moyen d'offrir aux agriculteurs plus de possibilités en termes d'assemblage d'espèces en contournant les contraintes de tri au niveau de la coopérative. Cependant, trier est une activité complexe qui nécessite des

investissements, du temps et de nouvelles compétences afin de trouver les réglages optimaux permettant de séparer efficacement les grains et ce quel que soit le matériel utilisé. Par ailleurs, la gestion des cultures associées génère des coûts supplémentaires en termes de capacité de stockage et nécessite une maîtrise technique pour limiter les risques d'altération et garantir la qualité sanitaire des lots.

Quelle que soit la solution explorée, **une analyse des coûts, contraintes et bénéfices engendrés par le tri des cultures associées à chaque maillon de la filière doit être menée**. Cela permettrait d'apprécier plus précisément les conditions d'acceptabilité de ces systèmes agricoles innovants par les différents acteurs pour construire collectivement les solutions permettant leur essor. En particulier, il est nécessaire de caractériser les conditions de succès du tri et de conduire une estimation précise des coûts. En effet il s'agit là d'un élément clé de la performance économique des cultures associées mais dont les estimations varient fortement selon les opérateurs et qui doivent être analysés au regard : (i) des gains de rendement escomptés, (ii) de l'amélioration attendue de la teneur en protéines des céréales, (iii) du prix de vente des productions et (iv) de la réduction des intrants réalisée.

Démarche proposée pour optimiser conjointement la récolte et le tri des graines

**Les questions posées par la récolte et le tri des cultures associées nécessitent d'être analysées en interaction entre chercheurs en agronomie, agriculteurs, coopératives et fabricants de matériel agricole, ceci pour optimiser la chaîne récolte-tri pour déterminer les conditions de réussite. Ces éléments techniques pourront être ensuite**

**remobilisées dans des démarches de co-conception d'itinéraires techniques « commercialisables ».**

A ce jour, via le projet européen ReMIX dans lequel je coordonne une tâche spécifique, j'ai d'ores et déjà entrepris des collaborations avec des fabricants de matériel agricole intéressés par la question des cultures associées. Il s'agit des Etablissements Denis, une PME française pour les aspects de tri et le groupe international AGCO pour la récolte.

Les premières expérimentations *in situ* en parcelles d'agriculteurs seront menées en 2019 et 2020 avec pour objectifs : (i) d'optimiser les réglages des moissonneuses batteuses pour la récolte de cultures associées en limitant la casse des grains et en maximisant la quantité de grains récolté, (ii) d'évaluer la capacité des trieurs à séparer efficacement des cultures associées selon les espèces et variétés et en fonction du taux de brisures et de la taille des graines, et *in fine* (iii) d'établir une évaluation économique globale de la chaîne récolte-tri en tenant compte des pertes à la récolte, de la valeur marchande des graines, du coût du tri sensu stricto mais également en intégrant les contraintes d'investissement et de temps de travail pour réaliser les différentes opérations de récolte et de tri.

J'envisage de conduire cette problématique en coordonnant un projet de recherche où j'intégrerai le co-encadrement d'un doctorant avec un spécialiste du machinisme. Ce dernier pourrait être un enseignant-chercheur de l'ENSFEA en charge de la formation des enseignants en agroéquipement. Cela serait pour moi l'occasion de renforcer les liens entre mes activités de recherche et d'enseignement et une nouvelle voie de travail interdisciplinaire pour enrichir mon bagage de chercheur en agronomie systémique et agroécologie.

## CHAPITRE 5 : PROJET DE RECHERCHE

Les travaux qui seront conduits dans le cadre de cet axe de mon projet de recherche permettront de réaliser des publications dans des revues comme : (i) Agronomy for Sustainable Development sur le concept d'itinéraire technique « commercialisable » et sur l'évaluation économique de divers itinéraires techniques « commercialisables » et (ii) European Journal of Agronomy pour présenter des résultats originaux issus des expérimentations de tests de récolte et tri, Ce travail permettra également la rédaction de publications techniques destinées aux praticiens qui en expriment le besoin et j'envisage par ailleurs de développer un outil d'aide à la conception d'itinéraires techniques « commercialisables » de cultures associées de type classeur Excel « carrossé » qui soit facilement accessible par les agriculteurs et les techniciens agricoles.

**de sécuriser la production des matières premières riches en protéines végétales et donc en particulier des légumineuses au moyen de pratiques agroécologiques tout en tenant compte de la qualité nutritionnelle des produits.**

Ces deux éléments justifient d'y consacrer un axe de mon projet de recherche (**Figure 39**) dans lequel je propose de tester les hypothèses suivantes : (i) les associations modifient la composition en oligo-éléments, macro-éléments et métaux lourds des grains et donc leur qualité nutritionnelle et sanitaire dès lors que la concentration dépasse certains seuils comme dans le cas du Cadmium où il est fixé à 0.2 mg.kg<sup>-1</sup> et (ii) les associations stabilisent la production face aux aléas et notamment par la réduction des effets des bioagresseurs.

### 3. Axe 2 du projet de recherche : Accroître et stabiliser la production et la qualité nutritionnelle

L'adoption des cultures associées par les agriculteurs est motivée par divers objectifs de production et bénéfices attendus parmi lesquels **l'espérance d'une meilleure stabilité des rendements face aux aléas climatiques** (Boyeux et Magnard 2013 ; Plaquette du projet ANR PerfCom 2012) confirmé entre autres par les travaux de Raseduzzaman et Jensen (2017). Cet **argument est particulièrement prégnant pour les agriculteurs qui visent la production de protéagineux** pour lesquels les rendements en culture pure sont extrêmement variables du fait notamment de facteurs biotiques limitants (agents pathogènes, ravageurs et adventices).

Dans le cadre de la transition alimentaire visant à substituer une partie des protéines animales par des protéines végétales il apparaît essentiel **d'accroître et**

Co-conception d'itinéraires techniques de cultures associées pour accroître et stabiliser la production et la qualité nutritionnelle en vue de leur intégration dans les systèmes de culture et les filières

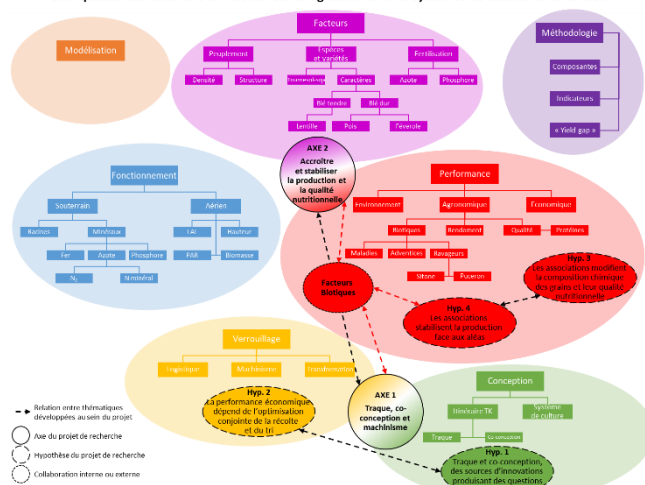


Figure 39 Positionnement dans la continuité des travaux précédents de l'axe 2 de mon projet de recherche et des deux hypothèses principales auxquelles cet axe cherchera à répondre (voir Figure 43 pour plus de détails).

#### 3.1. Hypothèse 3 : les associations modifient la composition chimique des grains et leur qualité nutritionnelle

De nombreuses études ont été consacrées à l'analyse de l'effet des cultures associées sur la teneur en protéines des grains. A l'inverse l'effet de cette

## CHAPITRE 5 : PROJET DE RECHERCHE

pratique sur la qualité nutritionnelle des graines et notamment sur la teneur en oligo-éléments, macro-éléments et métaux lourds a fait l'objet d'un nombre limité d'études dans la littérature scientifique. Pourtant cette question est cruciale pour la nutrition humaine quand on sait qu'à l'échelle mondiale, 60% de la population souffre de déficience en Fer, 30% en zinc, 30% en Iode, 15% en Sélénium et que les déficiences en calcium, magnésium et cuivre sont courantes aussi bien dans les pays en développement que dans les pays développés (White and Broadley, 2009).

Des analyses préliminaires, réalisées en partenariat avec la coopérative Qualisol sur la lentille suggèrent des différences en termes de concentration en certains oligo-éléments, macro-éléments et métaux lourds entre les cultures pures et les cultures associées qui doivent être analysés plus précisément. Les travaux de Inal et al. (2007) et Xiao et al. (2013) montrent que les cultures associées ont tantôt un effet positif sur la teneur en nutriments tantôt négatif. Des résultats comparables ont été mis en évidence par Gunes et al. (2007) dans le cas d'associations de blé-pois chiche pour lesquelles la concentration en fer était accrue dans les graines de la légumineuse alors que celle en zinc diminuait. Xia et al. (2013) ont quant à eux montré que la concentration en fer, manganèse, cuivre et zinc était réduite dans les grains de maïs du fait d'une moindre remobilisation des nutriments des parties végétatives vers les grains lorsqu'il était associé à différentes légumineuses.

Soulignons que si l'effet des cultures associées s'avère être positif sur les teneurs en éléments essentiels alors cela donnera aux acteurs de l'amont un argument supplémentaire pour faire accepter, par les acteurs aval de la filière, les produits issus de cette

pratique contribuant ainsi à déverrouiller une partie du système agricole.

Démarche proposée pour l'analyse de la composition chimique des grains et de leur qualité nutritionnelle

Ces résultats contradictoires, confirment la nécessité d'approfondir cette question dans le cadre de mon projet de recherche afin d'évaluer l'intérêt des associations pour améliorer la qualité nutritionnelle et sanitaire (si la concentration dépasse certains seuils) des produits agricoles et en particulier celle des légumineuses dans le cadre de la transition alimentaire.

**Pour traiter de cette question nous pourrions tirer profit de notre stock d'échantillons collectés depuis 2005 sur diverses espèces, dans différents contextes pédo-climatiques et selon divers modes de conduite.** Ces données seront complétées par celles issues des travaux menés par nos collègues de la Swedish University of Agricultural Sciences et de la Chinese Agricultural University afin d'accroître la gamme des espèces et conditions pédo-climatiques. Ainsi, nous serons en mesure de créer une base de données des concentrations en oligo-éléments, macro-éléments et métaux lourds (Sodium, Molybdène, Cadmium, Plomb, Bore, Magnésium, Aluminium, Silicium, Phosphore, Soufre, Calcium, Manganèse, Fer, Cobalt, Nickel, Cuivre, Zinc, Potassium, Sélénium, Arsenic, Vanadium) permettant de comparer systématiquement les cultures pures et les cultures associées.

A partir de ces résultats nous pourrions alors réaliser des analyses statistiques pour tester l'hypothèse principale selon laquelle les associations modifient la composition en oligo-éléments, macro-éléments et métaux lourds des grains et donc leur qualité nutritionnelle et sanitaire dès lors que la concentration

dépasse certains seuils. Cette analyse nous permettra aussi de tester d'autres hypothèses comme par exemple le fait qu'il existe des différences entre : (i) les éléments chimiques, (ii) les espèces et les variétés, (iii) les contextes pédoclimatique, (iv) l'intensité des compétitions inter- et intraspécifiques qui affectent différemment le rendement des cultures pures et des cultures associées et donc la dilution/concentration des ressources ou encore (v) la facilitation qui peut être liée à des transferts d'éléments chimiques entre plantes ou à l'augmentation de leur disponibilité.

Sous réserve que cette première analyse mette en évidence des différences significatives entre cultures pures et cultures associées alors j'envisage d'analyser cette problématique en construisant un projet de recherche combinant des expertises en agronomie, génétique, biochimie et écophysiologie ainsi qu'en écologie microbienne. Ce projet, s'inscrirait dans le prolongement du projet POSiTIF, auquel je participe, visant à « Promouvoir la tolérance du pois aux stress abiotique (Fer) et biotique (phytopathogène) via les interactions biotiques dans la rhizosphère » coordonné par Philippe Lemanceau (UMR Agroécologie).

Face à la complexité de cette question et à la diversité des entrées possibles un travail préliminaire pourrait être mené dans le cadre d'un projet de type « pari scientifique » au travers de l'encadrement d'un post-doc et en collaboration avec des chercheurs de UMR Agroécologie, UMR LSTM (Montpellier) et le LRSV (Toulouse) pour étudier l'effet des cultures associées sur la diversité structurelle et fonctionnelle des communautés microbiennes au regard des processus de compétition et facilitation pour l'acquisition des nutriments.

### 3.2. Hypothèse 4 : les associations stabilisent la production face aux aléas

Il est globalement admis que **les cultures associées permettent de stabiliser les niveaux de production permettant une sécurisation de la production notamment face aux aléas qu'ils soient climatiques ou biotiques.**

A titre d'exemple, il a été observé, après l'Ouragan Mitch que les agriculteurs d'Amérique centrale pratiquant des cultures associées avaient subi moins de dégâts que ceux cultivant des cultures pures (Altieri et al., 2012). Des résultats similaires ont été observés après l'ouragan Ike ayant frappé Cuba en 2008 et où les parcelles de cultures associées avaient subi des pertes de 50% contre 90 à 100% dans les cultures pures (Rosset et al., 2011).

Cette observation et cette hypothèse générale ont été confirmées dans une récente méta-analyse réalisée par Raseduzzaman et Jensen (2017) sur la base de 54 expérimentations montrant que les associations céréale-légumineuse présentaient un coefficient de variation du rendement plus faible que les légumineuses pures mais aussi que les céréales pures dans la plupart des cas. Pour autant, un certain nombre d'études ayant analysé la stabilité du rendement des cultures associées relativement aux cultures pures donnent à voir des conclusions parfois contradictoires (Luo et al. 2016; Dapaah et al. 2003; Blade et al. 1991; Faris et al. 1983).

La question de la stabilité et des modalités de son évaluation posent donc un certain nombre de questions et notamment d'un point de vue méthodologique. En effet, au-delà du choix de l'indicateur, on constate que la majorité des études qui ont abordé cette question l'ont fait en comparant des cultures pures et des cultures associées conduites de façon identiques. C'est le cas

## CHAPITRE 5 : PROJET DE RECHERCHE

d'ailleurs dans la méta-analyse de Raseduzzaman et Jensen (2017) où les auteurs ont exclu de leur analyse les expérimentations dans lesquelles la conduite des cultures pures était différente de celle des cultures associées. Ce choix est tout à fait justifiable mais il peut induire un biais méthodologique et notamment en faveur des cultures associées du fait que les expérimentations menées dans ce domaine sont généralement conduites dans des conditions à faible niveau d'intrants qui sont favorables aux cultures associées. D'ailleurs, **je fais l'hypothèse que les cultures pures, conduites de façon intensive, présentent une stabilité de rendement au moins comparable à celle des cultures associées.**

Dans le cadre d'une transition agroécologique et d'une approche d'agronomie systémique, la question de la stabilité devrait être abordée au travers de la comparaison d'une culture associée avec une ou deux cultures pures mais où chaque culture serait conduite en mettant en œuvre des itinéraires techniques adaptés en termes de variété, densité, fertilisation... Par ailleurs, l'analyse de la stabilité ne doit pas se limiter au rendement mais nécessite une évaluation multicritères en incluant en particulier la question de stabilité économique.

Par ailleurs, la plupart des études qui se sont intéressées à la stabilité des rendements des cultures associées l'ont fait à partir de la production totale de ces dernières. Là encore ce choix est tout à fait acceptable mais il est également nécessaire d'analyser la stabilité de la production de chacune des composantes de la culture associée ne serait-ce que pour tenir compte des besoins des différentes filières.

Ainsi nous faisons **l'hypothèse que le rendement des espèces en culture associée est généralement réduit par rapport aux cultures pures mais plus**

**stable et en particulier dans des conditions pédoclimatiques et biotiques défavorables.**

En effet, les différents travaux conduits sur les associations montrent que le rendement de chaque espèce en association est le plus souvent inférieure à celui obtenu en culture pure du fait d'une moindre densité et de la compétition exercée par l'espèce associée. Cependant, lorsque les conditions pédo-climatiques et biotiques sont défavorables, la culture associée permet, pour une espèce donnée, d'atteindre un niveau de production au moins comparable à celui de la culture pure avec en plus la production d'une certaine quantité de grains par l'autre espèce. Ainsi, la culture associée peut être vue comme un moyen de sécuriser la production des espèces difficiles à produire en culture pure et dans des conditions défavorables.

En particulier, dans les systèmes à bas niveau d'intrants comme en agriculture biologique, l'effet des facteurs biotiques est un élément déterminant du niveau de production. Or de nombreux travaux ont d'ores et déjà montré l'intérêt des associations pour réduire de façon globale l'impact des facteurs biotiques. Ainsi, nous faisons **l'hypothèse que la stabilité attendue des associations dans les systèmes à bas niveau d'intrants s'explique par la réduction des effets des bioagresseurs.** Cela s'explique notamment par la compensation qui s'opère entre les deux espèces dès lors qu'elles ne présentent pas les mêmes niveaux de sensibilité. Toutefois, un certain nombre de travaux, ciblant un ou quelques bioagresseurs ont montré que l'effet des cultures associées dépendait des organismes.

Par contre, **peu de travaux ont analysé simultanément l'effet des cultures associées sur une diversité d'agents pathogènes, de ravageurs et d'adventices en tenant compte des interactions avec les pratiques et le contexte pédoclimatique.** Or, des

## CHAPITRE 5 : PROJET DE RECHERCHE

travaux menés en ce sens permettraient **d'évaluer en partie les effets à moyen et long terme de l'introduction des cultures associées vis-à-vis d'une diversité de bioagresseurs** ce qui pourrait servir à la conception de systèmes de culture agroécologiques. Pour cela **il est nécessaire au préalable d'analyser les mécanismes sous-jacents pour concevoir des itinéraires techniques plus stables et plus résilients** face à ces bioagresseurs.

Au-delà de l'analyse du cortège des bioagresseurs, la question des bruches de la lentille (*Bruchus lentis* et *Bruchus signaticornis*) me semble être d'une importance particulière. En effet, les travaux réalisés dans le cadre de la thèse de L. Viguié ont montré qu'elles **réduisaient le rendement atteignable en moyenne de 40% en culture pure, et que l'association avec du blé n'avait pas d'effet sur le niveau d'infestation (Encadré 2)**.

Pour autant, à ce jour, la question des bruches de la lentille n'a pas fait l'objet d'études approfondies et cette question ne semblait pas prioritaire pour les acteurs économiques de cette filière en raison notamment de l'utilisation massive d'insecticides qui permettaient son contrôle dans les grandes zones de production. **Cette problématique risque de s'accroître dans les années à venir du fait du développement des surfaces de cultures de plantes hôtes, du réchauffement climatique et de la transition agroécologique qui tend à réduire l'utilisation des insecticides et le nombre de molécules autorisées mais qui pourrait être compensé par une augmentation des régulations biologiques (Jacquot 2016)**.

En l'état actuel des connaissances nous savons qu'il existe des lignées de légumineuses plus tolérantes aux bruches (Pascal Marget communication

personnelle). Malheureusement, leur développement prendra plusieurs années avant qu'elles ne soient disponibles pour les agriculteurs même si le séquençage du génome de la lentille, en cours de réalisation, donnera des outils pour accélérer le criblage de telles lignées.

Par ailleurs, des travaux conduits au sein de l'IEES UMR 1392 à Versailles ont permis de développer de nouvelles solutions de biocontrôle à base de kairomones, qui en imitant les composés organiques volatiles émis par les fleurs et les gousses permettent de piéger les bruches de la féverole. Ces travaux ont fait l'objet d'un brevet, et une start-up, AgriOdor, est en cours de création mais là encore cette la solution n'est pas disponible à ce jour pour la lentille.

Dans ce contexte, la question du contrôle des bruches doit être traitée sans plus attendre, et cela doit être fait de façon systémique en intégrant les autres verrous liés à la culture de la lentille comme la verse, la sensibilité à l'enherbement ou aux agents pathogènes. Toutes ces raisons font que j'ai décidé de consacrer une partie de mon projet de recherche pour traiter cette question en faisant **l'hypothèse que les cultures associées peuvent réduire les effets des bruches de la lentille ainsi que les autres facteurs limitants permettant de stabiliser et accroître la production en système à bas niveau d'intrants**.

Démarche proposée pour évaluer la stabilité de la production face aux aléas

Pour traiter ces hypothèses nous valoriserons les données acquises dans le cadre de l'essai système mis en œuvre en 2010 dans le cadre du projet ANR MicMac Design (**voir chapitre 2 paragraphe 2.4**) et prolongé par la suite pour une durée supplémentaire de trois ans de 2014 à 2016 (**Figure 40**).





## CHAPITRE 5 : PROJET DE RECHERCHE

connaissances : jeu de données, expertises, éléments disponibles dans la littérature, et modèles de simulation quantitatif. La méthode peut être appliquée *a priori* à tous les types de culture, y compris aux associations d'espèces (Robin et al. 2013).

Les travaux qui seront conduits dans le cadre de cet axe de mon projet de recherche permettront de réaliser des publications scientifiques notamment dans *Agronomy for Sustainable Development* sur : (i) l'évaluation de la stabilité des cultures associées et (ii) l'effet des cultures associées sur le cortège des bioagresseurs et leur effet cumulatif dans les rotations ainsi que dans des revues plus spécialisées à travers des focus sur les adventices, les ravageurs et les agents pathogènes. Ce travail permettra également de renforcer l'outil d'aide à la conception d'itinéraires techniques « commercialisables » de cultures associées évoqué précédemment en quantifiant des niveaux de risques potentiels.

En ce qui concerne l'effet des associations sur les bruches de la lentille, j'envisage le co-encadrement d'une thèse CIFRE, financée par la coopérative Qualisol (notre partenaire dans ce travail et avec qui nous avons engagé une réflexion sur le sujet). Cette thèse serait co-encadrée avec un écologue-entomologue, qui, comme précédemment pour les questions liées au machinisme agricole pourrait être un enseignant-chercheur de l'ENSFEA afin de renforcer les travaux en agroécologie au sein de notre établissement.

Cette thèse aura pour objectif d'évaluer la capacité des cultures associées à réduire la pression des bruches, ainsi que les autres facteurs limitants identifiés et ceci dans une approche d'agronomie systémique. Néanmoins il est nécessaire au préalable de conduire une analyse bibliographique approfondie qui pourrait

faire l'objet d'un stage de master 1 ou d'un projet d'étudiants afin de mieux comprendre **la biologie de cet insecte et ceci pour identifier les leviers mobilisables** et orienter nos choix en matière d'assemblage d'espèces.

En effet, comme cela a été mis en évidence pour une diversité de ravageurs (Trenbath 1993 ; Corre-Hellou et al. 2014), **les processus permettant de réduire les ravageurs dans les cultures associées sont complexes et divers** (effet barrière, effet dilution, modification du microclimat, effet répulsif sur certains ravageurs...). Malgré tout, sur la base des connaissances dont je dispose, il me semble que des pistes intéressantes concernent : (i) la recherche d'espèces répulsives à associer à la lentille, qui pourraient être combinées (ii) à des semis et/ou à l'utilisation de variétés plus précoces, (iii) des mélanges de variétés sans oublier (iv) un screening des variétés disponibles pour identifier les plus résistantes mais également les plus performantes pour la conduite en culture associée.

**Ces différentes questions nécessiteront des expérimentations de plusieurs natures : (i) des essais en laboratoire/serre** pour comprendre la biologie de cet insecte et tester l'effet répulsif de plantes associées ainsi que l'appétence/résistance des variétés disponibles et **(ii) des expérimentations en parcelles agricoles** pour comprendre la biologie de cet insecte en interaction avec les composantes du paysage et tester des itinéraires techniques alternatifs sur le contrôle des bruches ce qui nécessite de grandes surfaces du fait de sa mobilité.

### 3.3. La modélisation pour aider à la conception d'itinéraires techniques et au criblage de variétés adaptées

Une approche expérimentale classique ne permettra pas à elle seule de traiter de la question de la conception d'itinéraires techniques de cultures associées de fait notamment des interactions entre les différents leviers (fertilisation azotée, variétés, densités...) et du nombre de combinaisons possibles.

Cela met en évidence l'intérêt d'un couplage avec une approche par modélisation permettant une analyse plus systémique de l'effet de ces différents leviers, couvrant plus de combinaisons de pratiques et permettant de piloter efficacement les associations en fonction des objectifs visés (Naudin 2009 ; Naudin et al. 2010) contrairement aux différents leviers pris séparément.

travaux ont montré des différences de comportement des variétés entre culture pure et culture associée (Corre-Hellou et al. 2013 ; Carr et al. 1998 ; Hauggaard-Nielsen et Jensen 2001). Cela nécessite donc de la part des sélectionneurs de repenser les critères de sélection variétale et les programmes de sélection pour identifier des variétés adaptées à cette pratique en tenant compte de leurs effets à différents niveaux (Figure 41).

De la même façon, les densités optimales pour les cultures associées sont mal connues du fait notamment que la plupart des auteurs effectuent des expérimentations substitutives dans lesquelles chaque espèce est semée le plus souvent à 50% de celle des cultures pures. Or la densité totale de plantes pourrait être supérieure à celle des cultures pures en raison des complémentarités entre espèces. En dehors des espèces, des variétés et des densités, la structure spatiale des cultures associées (mélange sur le rang, rangs alternés ou bandes de largeurs variables) affecte également l'intensité des compétitions inter- et intraspécifiques en modifiant la distribution du rayonnement lumineux ainsi que le partage de l'eau et des nutriments.

La modélisation pourrait contribuer à optimiser les densités des espèces associées et leur arrangement spatial en fonction des objectifs de production visés et des espèces et variétés choisies. Cela constituerait un apport majeur pour accroître et stabiliser la production par les associations et notamment pour produire des connaissances génériques en particulier pour d'autres légumineuses d'intérêt comme le pois chiche (*Cicer arietinum*), le haricot Azuki (*Vigna angularis*) ou le pois carré (*Lathyrus sativus*).

Co-conception d'itinéraires techniques de cultures associées pour accroître et stabiliser la production et la qualité nutritionnelle en vue de leur intégration dans les systèmes de culture et les filières

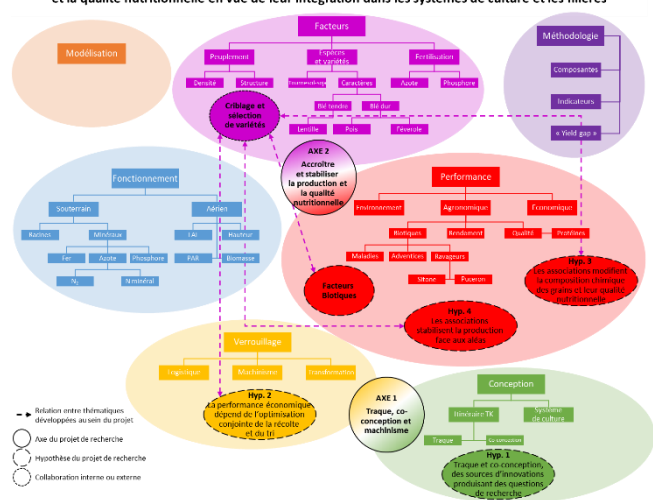


Figure 41 Interactions entre criblage/sélection de variétés et les différents axes et hypothèses de mon projet de recherche (voir Figure 43 pour plus de détails).

Entre autres, la modélisation pourrait permettre d'identifier et caractériser des traits d'espèces et de variétés adaptés à la culture associée et plus généralement aux systèmes à faible niveau d'intrants. Cette question représente un enjeu de taille pour les sélectionneurs car un certain nombre de

Pour ces différentes raisons j’ai souhaité inclure la modélisation dans mon projet de recherche (Figure 42) pour répondre à la question : « comment assembler des espèces et optimiser leur itinéraire technique en fonction d’objectifs bien définis ? ».

moins long. Une partie de ces travaux sera réalisée en collaboration étroite avec : (i) Noémie Gaudio, recrutée récemment dans l’UMR AGIR en tant que chargée de recherche sur la modélisation du fonctionnement des peuplements plurispécifiques et (ii) la communauté du modèle de culture STICS dont il existe une version pour les cultures associées en cours de développement.

Pour atteindre cet objectif il est nécessaire au préalable d’évaluer la qualité prédictive des différents modèles et dans certains cas cela nécessitera un travail de paramétrage. Pour cela nous pourrions nous appuyer sur le large jeu de données dont nous disposons comme je l’ai fait avec Gatien Falconnier sur la modélisation de la féverole à l’aide du modèle STICS<sup>4</sup>.

Toutefois, les modèles existants ne sont certainement pas en mesure de représenter toute la diversité des associations pratiquées par les agriculteurs et il pourra être nécessaire : (i) d’adapter certains formalismes des modèles de culture voire (ii) de construire un nouveau mode de représentation des mélanges d’espèces, ce qui relève des compétences de mes collègues modélisateurs *sensu stricto*.

Après avoir évalué la qualité prédictive des différents modèles, ceux-ci seront utilisés pour tester un certain nombre d’hypothèses évoquées précédemment dans mon projet de recherche et plus globalement dans l’ensemble de ce manuscrit. Enfin, pour concevoir des itinéraires techniques adaptés à différents objectifs et dans un contexte donné mais également pour penser les cultures associées de demain dans un contexte de réchauffement climatique

Co-conception d’itinéraires techniques de cultures associées pour accroître et stabiliser la production et la qualité nutritionnelle en vue de leur intégration dans les systèmes de culture et les filières

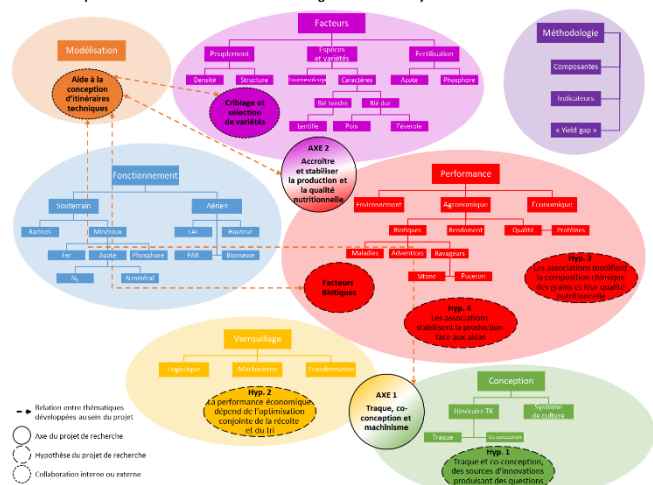


Figure 42 Positionnement dans mon projet de recherche de la modélisation comme outil d’aide à la conception d’itinéraires techniques et au criblage de variétés adaptées (voir Figure 43 pour plus de détails).

Démarche proposée pour utiliser la modélisation pour concevoir des itinéraires techniques et cribler des variétés

Mon projet de recherche ne vise pas à développer des modèles permettant de simuler le fonctionnement de ces mélanges ni à sélectionner des variétés adaptées aux cultures associées. Par contre, il s’agit, en tant qu’agronome d’utiliser les modèles comme des outils d’aide à la conception d’itinéraires techniques mais également à l’identification des traits d’espèces/variétés adaptés.

Pour réaliser ce travail plusieurs étapes sont nécessaires et s’inscrivent dans un temps plus ou

<sup>4</sup> Ce travail a donné lieu à la soumission d’un article dans la revue European Journal for agronomy actuellement en cours de révision co-écrit par Falconnier G., Journet E.-P., Bedoussac L., Vermue A.,

Chlebowski F., Beaudoin N., Justes E. et intitulé : « Modelling faba bean with the STICS soil-crop model: Parameterization and independent validation ».

la démarche consistera à **hybrider des connaissances expertes et scientifiques avec des simulations issues des modèles de culture**. Pour cela il pourrait être envisageable de s'appuyer sur le cadre de modélisation développé dans IPSIM à partir d'une hiérarchisation qualitative des facteurs par un arbre de décisions générique.

A ce jour je n'ai pas encore investi le champ de la modélisation de façon concrète. Néanmoins, une première collaboration sera mise en place dans le cadre de la thèse de Rémi Mahmoud ayant pour objectif de développer des approches mathématiques basées sur des théories issues de l'écologie des communautés afin de concevoir des règles d'assemblage et qui débutera en septembre 2019 sous le co-encadrement de Noémie Gaudio et Pierre Casadebaig (UMR AGIR). En parallèle, un post-doc a été recruté dans le cadre du projet ReMIX afin de travailler au développement du modèle STICS-cultures associées ce qui pourra nous permettre **d'évaluer la qualité prédictive de ce modèle et au besoin d'affiner son paramétrage**. Ces deux projets permettront ainsi de tester différentes hypothèses par des entrées de modélisation complémentaires ce qui devrait nous permettre d'avoir une meilleure vision des potentialités de chacune de ces approches.

#### 4. Conclusion

Les associations d'espèces présentent de nombreux atouts mais pour concevoir des itinéraires techniques adaptés à différents objectifs et dans un contexte donné il apparaît essentiel **d'hybrider des**

**connaissances expertes et scientifiques avec des simulations** issues des modèles de culture.

Cela justifie à mon sens la **diversité des approches que j'ai proposée dans le cadre de mon projet de recherche**, qu'il s'agisse de traque aux innovations, de co-conception ou d'approches plus théoriques sur l'évaluation de la stabilité, des traits d'espèces ou des mécanismes pour réduire les effets des bioagresseurs.

Mon projet de recherche ne vise pas à concevoir *sensu stricto* des systèmes de culture mais les démarches développées et les connaissances qui ont été acquises et qui le seront dans de ce projet (**Figure 43**) y contribueront avec **comme objectif non pas de concevoir des « systèmes de culture associée » mais bien de combiner les associations avec une diversité de leviers agronomiques, de façon optimale et acceptable par les acteurs dans une vision agroécologique**.

Pour des raisons évidentes de temps, de compétences et de moyens, mon projet de recherche ne peut pas traiter de toutes les questions présentées plus haut qui se posent au sujet des cultures. C'est pourquoi il m'a semblé important de **donner à voir les collaborations que ce projet vise à construire** pour que collectivement nous puissions combler autant que possible les trous de connaissances identifiés.

Pour finir, je soulignerai la volonté qui est la mienne et qui a orienté et orientera mes recherches à savoir : **produire des connaissances au service du monde agricole et des agriculteurs en particulier**.

## CHAPITRE 5 : PROJET DE RECHERCHE

### Co-conception d'itinéraires techniques de cultures associées pour accroître et stabiliser la production et la qualité nutritionnelle en vue de leur intégration dans les systèmes de culture et les filières

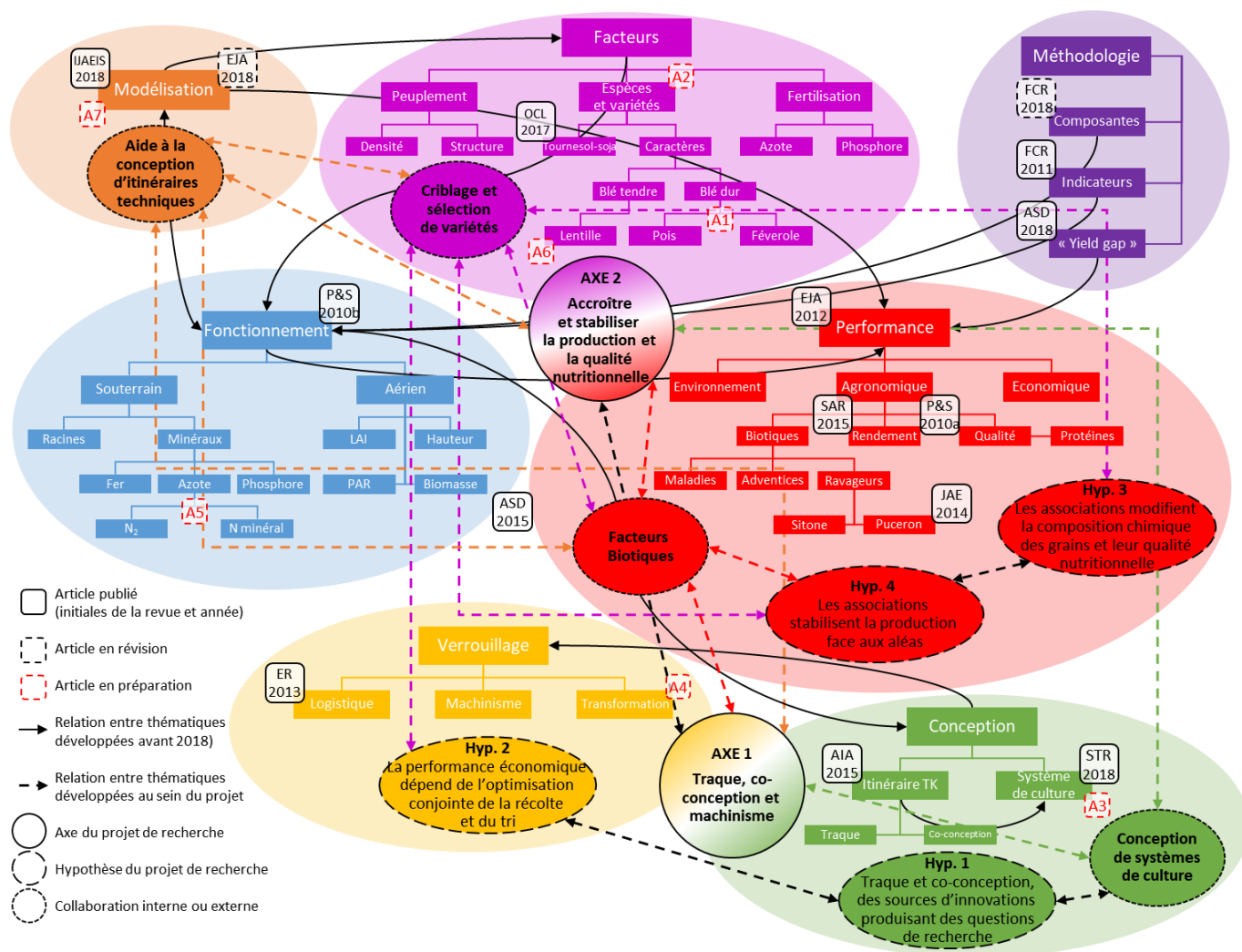


Figure 43 Représentation schématique des thématiques de recherche développées depuis 2006 et de mon projet de recherche (axes, hypothèses, collaborations et relations entre thématiques) ainsi que la liste des publications acceptées, en révision et en préparation.



# RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES



## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abad A, Lloveras J, Michelena A (2004) Nitrogen fertilization and foliar urea effects on durum wheat yield and quality and on residual soil nitrate in irrigated Mediterranean conditions. *Field Crops Res* 87:257-269. doi: 10.1016/j.fcr.2003.11.007
- Altieri M (1999) The ecological role of biodiversity in agroecosystems. *Agric Ecosys Environ* 74:19-31. doi: 10.1016/S0167-8809(99)00028-6
- Altieri, M.A., Funes-Monzote, F.R., Petersen, P., 2012. Agroecologically efficient agricultural systems for smallholder farmers: contributions to food sovereignty. *Agron. Sustain. Dev.* 32 (1), 1 – 13. <http://dx.doi.org/10.1007/s13593-011-0065-6>.
- Andersen MK, Hauggaard-Nielsen H, Ambus P, Jensen ES (2004) Biomass production, symbiotic nitrogen fixation and inorganic N use in dual and tri-component annual intercrops. *Plant Soil* 266:273-287. doi: 10.1007/s11104-005-0997-1
- Anil L, Park J, Phipps R H, Miller FA (1998) Temperate intercropping of cereals for forage: a review of the potential for growth and utilization with particular reference to the UK. *Grass Forage Sci* 53:301-317. doi: 10.1046/j.1365-2494.1998.00144.x
- Aubertot J, Robin M (2013) Injury Profile SIMulator, a qualitative aggregative modelling framework to predict crop injury profile as a function of cropping practices, and the abiotic and biotic environment. I. Conceptual bases. *PLoS One*. doi: 10.1371/journal.pone.0073202
- Banik P, Midya A, Sarkar BK, Ghose SS (2006) Wheat and chickpea intercropping systems in an additive experiment. Advantages and weed smothering. *Europ J Agron* 24:325-332. doi: 10.1016/j.eja.2005.10.010
- Barillot R, Combes D, Chevalier V, Fournier C, Escobar-Gutierrez A (2012) How does pea architecture influence light sharing in virtual wheat-pea mixtures? A simulation study based on pea genotypes with contrasting architectures. *AoB Plants*. doi: 10.1093/aobpla/pls038
- Barillot R, Combes D, Pineau S, Huynh P, Escobar-Gutiérrez A (2014a) Comparison of the morphogenesis of three genotypes of pea (*Pisum sativum*) grown in pure stands and wheat-based intercrops. *AoB Plants*. doi: 10.1093/aobpla/plu006
- Barillot R, Escobar-Gutiérrez AJ, Fournier C, Huynh P, Combes D (2014b) Assessing the effects of architectural variations on light partitioning within virtual wheat-pea mixtures. *Ann Bot*. doi: 10.1093/aob/mcu099
- Bedoussac L, Justes E (2010a) 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 Soil* 330:19-35. doi: 10.1007/s11104-009-0082-2
- Bedoussac L, Justes E (2010b) Dynamic analysis of competition and complementarity for light and N use to understand the yield and the protein concentration of a durum wheat-winter pea intercrop. *Plant Soil* 330:37-54. doi: 10.1007/s11104-010-0303-8
- Bedoussac L, Justes E (2011) Comparison of commonly used indices for evaluating species interactions and intercrop efficiency: Application to durum wheat-winter pea intercrops. *Field Crops Res* 124 25-36. doi: 10.1016/j.fcr.2011.05.025

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Bedoussac L. (2009) Analyse du fonctionnement des performances des associations blé dur-pois d'hiver et blé dur-féverole d'hiver pour la conception d'itinéraires techniques adaptés à différents objectifs de production en systèmes bas-intrants. PhD thesis, INP-Toulouse
- Bedoussac L., Journet E.-P., Hauggaard-Nielsen H., Naudin C., Corre-Hellou G., Jensen E. S., Prieur L., Justes E. (2015). Ecological principles underlying the increase of productivity achieved by cereal-grain legume intercrops in organic farming. A review. *Agronomy for sustainable development* 35(3):911-935
- Bellostas N, Hauggaard-Nielsen H, Andersen M, Jensen ES (2003) Early interference dynamics in intercrops of pea, barley and oilseed rape. *Biol Agric Hor.* 21:337-348. doi: 10.1080/01448765.2003.9755277
- Blade, S.F., Mather, D.E., Singh, B.B., Smith, D.L., 1991. Evaluation of yield stability of cowpea under sole and intercrop management in Nigeria. *Euphytica* 61 (3), 193–201. <http://dx.doi.org/10.1007/BF00039658>.
- Bousseau D., 2009. Associations céréales-légumineuses et mélanges de variétés de blé tendre : point de vue agronomique et pratique d'une coopérative. *Innovations Agronomiques* 7, 129-137.
- Boyeux M., Magnard A., 2013. Cultures associées : l'union fait la force. *France Agricole* 3488, 37–42.
- Brisson N, Bussi re F, Ozier-Lafontaine H, Tournebize R, Sinoquet H (2004) Adaptation of the crop model STICS to intercropping. Theoretical basis and parameterisation. *Agronomie* 24:409-421. doi: 10.1051/agro:2004031
- Brophy L, Heichel G (1989) Nitrogen release from roots of alfalfa and soybean grown in sand culture. *Plant Soil* 116:77-84. doi: 10.1007/BF02327259
- Bulson H, Snaydon R, Stopes C (1997) Effects of plant density on intercropped wheat and field beans in an organic farming system. *J Agric Sci* 128:59-71
- Caldwell RM (1987) Plant architecture and resource competition. *Ecological studies* 61:164-179. doi: 10.1007/978-3-642-71630-0\_8
- Carr PM, Martin GB, Caton JS, Poland W (1998) Forage and nitrogen yield of barley-pea and oat-pea intercrops. *Agronomy J* 90:79-84. doi: 10.2134/agronj1998.00021962009000010015x
- Cenpukdee U, Fukai S (1992a) Cassava/legume intercropping with contrasting cassava cultivars. 1. Competition between component crops under three intercropping conditions. *Field Crops Res* 29:113-133. doi: 10.1016/0378-4290(92)90082-K
- Cenpukdee U, Fukai S (1992b) Cassava/legume intercropping with contrasting cassava cultivars. 2. Selection criteria for cassava genotypes in intercropping with two contrasting legume crops. *Field Crops Res* 29:135-149. doi: 10.1016/0378-4290(92)90083-L
- Chalk PM, Peoples MB, McNeill AM, Boddey RM, Unkovich MJ, Gardener MJ, Silva CF, Chen D (2014) Methodologies for estimating nitrogen transfer between legume and companion species in agro-systems: A review of <sup>15</sup>N enriched techniques. *Soil Biol Biochem* 73:10-21. doi: 10.1016/j.soilbio.2014.02.005
- Connolly J, Wayne P, Murray R (1990) Time course of plant-plant interactions in experimental mixtures of annuals - Density, frequency, and nutrient effects. *Oecologia* 82:513-526. doi: 10.1007/BF00319795

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Corre-Hellou G (2005) Acquisition de l'azote dans des associations pois-orge (*Pisum sativum* L. – *Hordeum vulgare* L.) en relation avec le fonctionnement du peuplement. Thèse de doctorat en sciences agronomiques de l'école doctorale d'Angers

Corre-Hellou G, Brisson N, Launay M, Fustec J, Crozat Y (2007) Effect of root depth penetration on soil nitrogen competitive interactions and dry matter production in pea-barley intercrops given different soil nitrogen supplies. *Field Crops Res* 103:76-85. doi: 10.1016/j.fcr.2007.04.008

Corre-Hellou G, Dibet A, Hauggaard-Nielsen H, Crozat Y, Gooding M; Ambus P, Dahlmann C, von Fragstein P, Pristeri A, Monti M, Jensen ES (2011) The competitive ability of pea-barley intercrops against weeds and the interactions with crop productivity and soil N availability. *Field Crops Res* 122:264-272. doi: 10.1016/j.fcr.2011.04.004

Corre-Hellou G, Faure M, Launay M, Brisson N, Crozat Y (2009) Adaptation of the STICS intercrop model to simulate crop growth and N accumulation in pea-barley intercrops. *Field Crops Res* 113:72-81. doi: 10.1016/j.fcr.2009.04.007

Corre-Hellou G, Fustec J, Crozat Y (2006) Interspecific competition for soil N and its interaction with N<sub>2</sub> fixation, leaf expansion and crop growth in pea-barley intercrops. *Plant Soil* 282: 195-208. doi: 10.1007/s11104-005-5777-4

Corre-Hellou G., Baranger A., Bedoussac L., Cassagne N., Cannavacciuolo M., Joëlle J., Pelzer E., Piva G. (2014) Interactions entre facteurs biotiques et fonctionnement des associations végétales. *Innovations Agronomiques* 40:25-42

Cox GW, Atkins MD (1979) *Agricultural ecology: An analysis of world food production systems*. Freeman WH, San Francisco

Crews TE, Peoples MB (2004) Legume versus fertilizer sources of nitrogen: ecological tradeoffs and human needs. *Agric Ecosyst Environ* 102:279-297. doi: 10.1016/j.agee.2003.09.018

Crozat Y, Aveline A, Coste F, Gillet J, Domenach A (1994) Yield performance and seed production pattern of field-grown pea and soybean in relation to N nutrition. *Eur J Agron* 3:135-144. doi: 10.1016/S1161-0301(14)80119-6

Cudney D, Jordan L, Hall A (1991) Effect of wild oat (*Avena fatua*) infestations on light interception and growth rate of wheat (*Triticum aestivum*). *Weed Sci* 39:175-179

Dapaah, H.K., Asafu-Agyei, J.N., Ennin, S.A., Yamoah, C., 2003. Yield stability of cassava, maize, soya bean and cowpea intercrops. *J. Agric. Sci.* 140 (01), 73–82. <http://dx.doi.org/10.1017/S0021859602002770>.

David C, Jeuffroy MH, Henning J, Meynard JM (2005) Yield variation in organic winter wheat: a diagnostic study in the Southeast of France. *Agron Sustain Dev* 25:213-223 doi: 10.1051/agro:2005016

Davies B, Baulcombe D, Crute I, Dunwell J, Gale M, Jones J, Pretty J, Sutherland W, Toulmin C (2009) *Reaping the benefits: science and the sustainable intensification of global agriculture*. Royal Society, London

Dreccer M, Schapendonk A, Slafer G, Rabbinge R (2000) Comparative response of wheat and oilseed rape to nitrogen supply: absorption and utilisation efficiency of radiation and nitrogen during the reproductive stages determining yield. *Plant Soil* 220:189-205. doi: 10.1023/A:1004757124939

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Falconnier G. N., Descheemaeker K., Van Mourik T.A., Adam M., Sogoba B., Giller K.E. (2017). Co-learning cycles to support the design of innovative farm systems in southern Mali *European Journal of Agronomy* 89, 61–74.
- FAO (2010) The state of the food insecurity in the world. Addressing food insecurity in protracted crises. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <http://www.fao.org/docrep/013/i1683e/i1683e.pdf>. Accessed 7 November 2014
- Faris, M.A., Araujo, M.D., Lira, M.D.A., Arcovere, A.S.S., 1983. Yield stability in intercropping studies of sorghum or maize with cowpea or common bean under different fertility levels in Northeastern Brazil. *Can. J. Plant Sci.* 63 (4), 789–799. <http://dx.doi.org/10.4141/cjps83-102>.
- Fares M, Magrini MB, Triboulet P (2012) Transition agroécologique, innovation et effets de verrouillage: le rôle de la structure organisationnelle des filières. Le cas de la filière blé dur française. *Cah Agric* 21:34-45. doi: 10.1684/agr.2012.0539
- Fujita K, Ofosubudu KG, Ogata S (1992) Biological nitrogen fixation in mixed legume-cereal cropping systems. *Plant Soil* 141:155-175. doi: 10.1007/BF00011315
- Fukai S (1993) Intercropping - bases of productivity. *Field Crops Res* 34:239-245. doi: 10.1016/0378-4290(93)90116-5
- Fukai S, Trenbath B (1993) Processes determining intercrop productivity and yields of component crops. *Field Crops Res* 34:247-271. doi: 10.1016/0378-4290(93)90117-6
- Fustec J, Jamont M, Joly FX, Piva G, Cannavacciuolo M, Cassagne N (2014) Measuring nitrogen transfer in annual intercrops. *Proceedings of the European Society for Agronomy Congress*
- Fustec J, Lesuffleur F, Mahieu S, Cliquet JB (2010) Nitrogen rhizodeposition of legumes. A review *Agron Sustain Dev* 30: 57-66. doi: 10.1051/agro/2009003
- Gan YT, Liang C, Hamel C, Cutforth H, Wang H (2011) Strategies for reducing the carbon footprint of field crops for semiarid areas - A Review. *Agron Sustain Dev* 31:643-656. doi: 10.1007/s13593-011-0011-7
- Garnier E, Navas ML, Austin MP, Lilley JM, Gifford RM (1997) A problem for biodiversity-productivity studies: how to compare the productivity of multispecific plant mixtures to that of monocultures? *Acta Oecol* 18: 657-670. doi: 10.1016/S1146-609X(97)80049-5
- Garrido-Lestache E, López-bellido RJ, López-bellido L (2004) Effect of N rate, timing and splitting and N type on bread-making quality in hard red spring wheat under rainfed Mediterranean conditions *Field Crops Res* 85:213-236. doi: 10.1016/S0378-4290(03)00167-9
- Gastal F, Belanger G (1993) The effects of nitrogen fertilization and the growing season on photosynthesis of field-grown tall fescue (*Festuca arundinacea* Schreb.) canopies. *Ann Bot* 72:401-408
- Geels F. (2011). The multi-level perspective on sustainability transitions: Responses to seven criticisms, *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 1(1), 24-40.
- Ghaley B B, Hauggaard-Nielsen H, Høgh-Jensen H, Jensen E S (2005) Intercropping of wheat and pea as influenced by nitrogen fertilization. *Nutr Cycl Agroecosyst* 73:201-212

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Goldberg D (1990) Components of resource competition in plant communities. In: Grace JB, Tilman D (eds) Perspectives on plant competition, Academic Press, San Diego, pp 27-50

Gooding MJ, Kasynova E, Ruske R Hauggaard-Nielsen H, Jensen ES, Dahlmann C, Fragstein P von, Dibet A, Corre-Hellou G, Crozat Y; Pristeri A, Romeo M, Monti M, Launay M (2007) Intercropping with pulses to concentrate nitrogen and sulphur in wheat. *J Agric Sci* 145:469-479. doi: 10.1017/S0021859607007241

Goulet F., Pervanchon F., Conteau C., Cerf M. (2008). Les agriculteurs innovent par eux-mêmes pour leurs systèmes de culture. Chapitre de : Systèmes de culture innovants et durable : quelles méthodes pour les mettre au point et les évaluer ?. Educagri Editions ; AgriParisTech, 53-69.

Griffon M (2006) Nourrir la planète. Odile Jacob, Paris

Gunes, A., Inal, A., Adak, M. S., Alpaslan, M., Bagci, E. G., Erol, T. & Pilbeam, D. J. (2007). Mineral nutrition of wheat, chickpea and lentil as affected by mixed cropping and soil moisture. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 78(1): 83-96.

Hamblin A, Tennant D (1987) Root length density and water uptake in cereals and grain legumes: how well are they correlated. *Aust. J. Agric. Res.* 38:513-527"

Hauggaard-Nielsen H, Ambus P, Jensen ES (2001a) Temporal and spatial distribution of roots and competition for nitrogen in pea-barley intercrops - a field study employing P-32 technique. *Plant Soil* 236:63-74. doi: 10.1023/A:1011909414400

Hauggaard-Nielsen H, Ambus P, Jensen ES (2001b) Interspecific competition, N use and interference with weeds in pea-barley intercropping. *Field Crops Res* 70:101-109. doi: 10.1016/S0378-4290(01)00126-5

Hauggaard-Nielsen H, Ambus P, Jensen ES (2003) The comparison of nitrogen use and leaching in sole cropped versus intercropped pea and barley. *Nutr Cycl Agroecosyst* 65:289-300. doi: 10.1023/A:1022612528161

Hauggaard-Nielsen H, Andersen MK, Jørnsgard B, Jensen ES (2006) Density and relative frequency effects on competitive interactions and resource use in pea-barley intercrops. *Field Crops Res* 95:256-267. doi: 10.1016/j.fcr.2005.03.003

Hauggaard-Nielsen H, Gooding M, Ambus P, Corre-Hellou G, Crozat Y, Dahlmann C, Dibet A, von Fragstein P, Pristeri A, Monti M, Jensen ES (2009a) Pea-barley intercropping and short-term subsequent crop effects across European organic cropping conditions. *Nutr Cycl Agroecosyst* 85:141-155. doi: 10.1007/s10705-009-9254-y

Hauggaard-Nielsen H, Gooding M, Ambus P, Corre-Hellou G, Crozat Y, Dahlmann C, Dibet A, von Fragstein P, Pristeri A, Monti M, Jensen ES (2009b) Pea-barley intercropping for efficient symbiotic N<sub>2</sub>-fixation, soil N acquisition and use of other nutrients in European organic cropping systems. *Field Crops Res* 113:64-71. doi: 10.1016/j.fcr.2009.04.009

Hauggaard-Nielsen H, Jensen ES (2001) Evaluating pea and barley cultivars for complementarity in intercropping at different levels of soil N availability. *Field Crops Res* 72:185-196. doi: 10.1016/S0378-4290(01)00176-9

Hauggaard-Nielsen H, Jensen ES (2005) Facilitative root interactions in intercrops. *Plant Soil* 274:237-250. doi: 10.1007/1-4020-4099-7\_13

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Hauggaard-Nielsen H, Jørnsgard B, Kinane J, Jensen ES (2007) Grain legume-cereal intercropping: The practical application of diversity, competition and facilitation in arable and organic cropping systems. *Renewable Agric Food Syst* 23: 3-12. doi: 10.1017/S1742170507002025

Hogh-Jensen H, Schjoerring JK (2001) Rhizodeposition of nitrogen by red clover, white clover and ryegrass leys. *Soil Biol Biochem* 33: 439-448. doi: 10.1016/S0038-0717(00)00183-8

Husson O., Tran Quoc H., Boulakia S., Chabanne A., Tivet F., Bouzinac S., Lienhard P., Michellon R., Chabierski S., Boyer J., Enjalric F., Rakotondramanana, Narcisse Moussa, Jullien F., Balarabe O., Rattanatray B., Castella J.C., Charpentier H., Séguy L. (2015). Co-designing innovative cropping systems that match biophysical and socio-economic diversity: The DATE approach to Conservation Agriculture in Madagascar, Lao PDR and Cambodia *Renewable Agriculture and Food Systems*: 31(5); 452–470. doi:10.1017/S174217051500037X

IAASTD (2009) International assessment of agricultural knowledge, science and technology for development. Global Report. [http://apps.unep.org/publications/pmtdocuments/-Agriculture%20at%20a%20crossroads%20-%20Synthesis%20report-2009Agriculture\\_at\\_Crossroads\\_Synthesis\\_Report.pdf](http://apps.unep.org/publications/pmtdocuments/-Agriculture%20at%20a%20crossroads%20-%20Synthesis%20report-2009Agriculture_at_Crossroads_Synthesis_Report.pdf) Accessed 7 November 2014

Inal, A., Gunes, A., Zhang, F. & Cakmak, I. (2007). Peanut/maize intercropping induced changes in rhizosphere and nutrient concentrations in shoots. *Plant Physiology and Biochemistry* 45(5): 350-356.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2014) Climate Change Synthesis Report Summary for Policymakers. 1–32

Jackson W, Piper J (1989) The necessary marriage between ecology and agriculture. *Ecology* 70:1591-1593. doi: 10.2307/1938090

Jacquot M. (2016). Biodiversité et fonctionnement écologique des agroécosystèmes à base de manguiers à La Réunion. PhD thesis, Biodiversité et Ecologie. Université de la Réunion

Jensen ES (1996a) Grain yield, symbiotic N<sub>2</sub> fixation and interspecific competition for inorganic N in pea-barley intercrops. *Plant Soil* 182:25-38. doi: 10.1007/BF00010992

Jensen ES (1996b) Barley uptake of N deposited in the rhizosphere of associated field pea. *Soil Biol Biochem* 28:159-168. doi: 10.1016/0038-0717(95)00134-4

Johansen A, Jensen ES (1996) Transfer of N and P from intact or decomposing roots of pea to barley interconnected by an arbuscular mycorrhizal fungus. *Soil Biol Biochem* 28:73-81. doi: 10.1016/0038-0717(95)00117-4

Jolliffe PA (2000) The replacement series. *J Ecol* 88:371-385. doi: 10.1046/j.1365-2745.2000.00470.x

Jolliffe PA, Wanjau FM (1999) Competition and productivity in crop mixtures: some properties of productive intercrops. *J Agric Sci* 132:425-435

Justes E, Beaudoin N, Bertuzzi P, Charles R, Constantin J, Dürr C, Hermon C, Joannon A, Le Bas C, Mary B, Mignolet C, Montfort F, Ruiz L, Sarthou JP, Souchère V, Tournebize J, Savini I, Réchauchère O (2012) Réduire les fuites de nitrate au moyen de cultures intermédiaires : conséquences sur les bilans d'eau et d'azote, autres services écosystémiques. Synthèse du rapport d'étude, INRA.

Kim S, Dale BE (2005) Life cycle assessment of various cropping systems utilized for producing biofuels: bioethanol and biodiesel. *Biomass Bioenerg* 29:426-439. doi: 10.1016/j.biombioe.2005.06.004

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Kiniry J, Jones C, O'Toole J, Blanchet R, Cabelguenne M, Spanel D (1989) Radiation-use efficiency in biomass accumulation prior to grain-filling for five grain-crop species. *Field Crops Res* 20:51-64 doi: 10.1016/0378-4290(89)90023-3
- Knudsen MT, Hauggaard-Nielsen H, Jørnsgard B, Jensen ES (2004). Comparison of interspecific competition and N use in pea-barley, faba bean-barley and lupin-barley intercrops grown at two temperate locations. *J Agric Sci* 142:617-627 . doi: 10.1017/S0021859604004745
- Launay M, Brisson N, Satger S, Hauggaard-Nielsen H, Corre-Hellou G, Kasynova E, Ruske R, Jensen ES, Gooding MJ (2009). Exploring options for managing strategies for pea-barley intercropping using a modeling approach. *Europ J Agron* 31:85-98. doi: 10.1016/j.eja.2009.04.002
- Le Bellec F., Rajaud A., Ozier-Lafontaine H., Bockstaller C., Malezieux E. (2012). Evidence for farmers' active involvement in co-designing citrus cropping systems using an improved participatory method *Agron. Sustain. Dev.* 32:703–714 DOI 10.1007/s13593-011-0070-9
- Lefèvre V., Capitaine M., Peigné J., Estrade J.R. (2014). Farmers and agronomists design new biological agricultural practices for organic cropping systems in France *Agron. Sustain. Dev.* 34:623–632 DOI 10.1007/s13593-013-0177-2
- Lemaire G, Gastal F (1997) N uptake and distribution in plant canopies. In: Lemaire G (ed) *Diagnosis of the nitrogen status in crops*, Springer, Heidelberg, pp 3-43
- Lesuffleur F, Salon C, Jeudy C, Cliquet JB (2013) Use of a  $^{15}\text{N}_2$  labelling technique to estimate exudation by white clover and transfer to companion ryegrass of symbiotically fixed N. *Plant Soil* 369:187-197. doi: 10.1007/s11104-012-1562-3
- Liebman M (1988) Ecological suppression of weeds in intercropping systems: a review. In: Altieri MA, Liebman M (eds) *Weed management in agroecosystems: Ecological approaches*, CRC Press, Boca Raton, pp 197-212
- Liebman M, Davis A (2000) Integration of soil, crop and weed management in low-external-input farming systems. *Weed Res* 40:27-47. doi: 10.1046/j.1365-3180.2000.00164.x
- Liebman M, Dyck E (1993) Crop rotation and intercropping strategies for weed management. *Ecological Applications* 3:92-122. doi: 10.2307/1941795
- Lithourgidis AS, Vasilakoglou IB, Dhima KV, Dordas CA, Yiakoulaki MD (2006) Forage yield and quality of common vetch mixtures with oat and triticale in two seeding ratios. *Field Crops Res* 99:106-113. doi: 10.1016/j.fcr.2006.03.008
- Loomis RS, Williams WA (1963) Maximum crop productivity: an estimate. *Crop Sci* 3:67-72. doi: 10.2135/cropsci1963.0011183X000300010021x
- Loyce C., Wery J., 2006. Les outils des agronomes pour l'évaluation et la conception des systèmes de culture. In: Doré T., Le Bail M., Martin P., Ney B., Roger-Estrade J. (Eds.), *L'agronomie aujourd'hui*. Ed. QUAE Editions, pp. 77-95.
- Luo, S., Yu, L., Liu, Y., Zhang, Y., Yang, W., Li, Z., Wang, J., 2016. Effects of reduced nitrogen input on productivity and N<sub>2</sub>O emissions in a sugarcane/soybean intercropping system. *Eur. J. Agron.* 81, 78–85. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eja.2016.09.002>.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Magrini M.-B., Triboulet P., Bedoussac L. (2013). Pratiques agricoles innovantes et logistique des coopératives agricoles. Une étude ex-ante sur l'acceptabilité de cultures associées blé dur-légumineuses. *Economie rurale* 338:25-45
- Mahieu S (2007) Assessment of the below ground contribution of field grown pea (*Pisum sativum* L.) to the soil N pool. PhD thesis, Université d'Angers
- Mahon JD, Child JJ (1979) Growth response of inoculated peas (*Pisum sativum*) to combined nitrogen. *Can J Bot* 57:1687-1693. doi: 10.1139/b79-206
- Malézieux E, Crozat Y, Dupraz C, Laurans M, Makowski D, Ozier-Lafontaine H., Rapidel B, de Tourdonnet S, Valantin-Morison M (2009) Mixing plant species in cropping systems: concepts, tools and models. A review. *Agron Sustain Dev* 29:43-62. doi: 10.1051/agro:2007057
- Martin G. (2015). A conceptual framework to support adaptation of farming systems – Development and application with Forage Rummy. *Agricultural Systems* 132, 52–61.
- Mathé H., Tixier D. (2010). *La logistique.*, coll. Que sais-je ?, éd. PUF.
- Mcdonald GK (2003) Competitiveness against grass weeds in field pea genotypes. *Weed Res* 43:48-58. doi: 10.1046/j.1365-3180.2003.00316.x
- Mead R, Willey RW (1980) The concept of a 'land equivalent ratio' and advantages on yields from intercropping. *Exp Agric* 16:217-228. doi: 10.1017/S0014479700010978
- Meynard J.M., Messéan A., Charlier A., Charrier F., Fares M., Le Bail M., Magrini M.B., Savini I. (2013). Freins et leviers à la diversification des cultures. Etude au niveau des exploitations agricoles et des filières. Synthèse du rapport d'étude, INRA, 52 p.
- Meynard JM, Dedieu B, Bos B (2012). Re-design and co-design of farming systems: an overview of methods and practices. In: Darnhofer I, Gibbon D, Dedieu B (eds) *Farming Systems Research into the 21st century: the new dynamic*. Springer, pp 407–431.
- Midmore DJ (1993) Agronomic modification of resource use and intercrop productivity. *Field Crops Res* 34:357-380. doi: 10.1016/0378-4290(93)90122-4
- Monteith J (1977) Climate and the efficiency of crop production in Britain. *Phil Trans R Soc Lond B* 281:277-294. doi: 10.1098/rstb.1977.0140
- Natarajan M, Willey R (1980a) Sorghum-pigeonpea intercropping and the effects of plant population density. 1. Growth and yield. *J Agric Sci* 95:51-58. doi: 10.1017/S0021859600029269
- Natarajan M, Willey R (1980b) Sorghum-pigeonpea intercropping and the effects of plant population density. 2. Resource use. *J Agric Sci* 95:59-65. doi: 10.1017/S0021859600029270
- Naudin C, Corre-Hellou G, Pineau S, Crozat Y, Jeuffroy MH (2010) The effect of various dynamics of N availability on winter pea-wheat intercrops: crop growth, N partitioning and symbiotic N<sub>2</sub> fixation. *Field Crops Res* 119:2-11. doi: 10.1016/j.fcr.2010.06.002



## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Naudin C, van der Werf HMG, Jeuffroy MH, Corre-Hellou G (2014) Life cycle assessment applied to pea-wheat intercrops: A new method for handling the impacts of co-products. *J Clean Prod* 73:80-87. doi: 10.1016/j.jclepro.2013.12.029

Naudin C. (2009) Nutrition azotée des associations Pois-Blé d'hiver (*Pisum sativum* L. – *Triticum aestivum* L.) : Analyse, modélisation et propositions de stratégies de gestion. PhD thesis, Université d'Angers

Ndzana R. A., Magro A., Bedoussac L., Justes E., Journet E.-P., Hemptinne J.-L. (2014). Is there an associational resistance of winter pea - durum wheat intercrops towards *Acyrtosiphon pisum* Harris? *Journal of Applied Entomology* 138(8) 577:585

Nieder R, Benbi DK (2008) Carbon and nitrogen in the terrestrial environment. Springer, Heidelberg

Niggli U, Fließbach A, Hepperly P, Scialabba N (2009). Low greenhouse gas agriculture: mitigation and adaptation potential of sustainable farming systems. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <http://www.fcn.org.uk/sites/default/files/low-greenhouse-gas-agriculture.pdf>. Accessed 7 November 2014

Oelhermann M, Echarte L, Vachon K, Dubois C (2009) The role of complex agroecosystems in sequestering carbon and mitigating global warming. *Earth Environ Sci* 6:20-31. doi:10.1088/1755-1307/6/24/242031

Ofori F, Stern WR (1987) Cereal - legume intercropping systems. *Adv Agron* 41:41-90

Pardey PG, Pingali PL (2010) Reassessing international agricultural research for food and agriculture. Report prepared for GCARD.

Paynel F, Murray P, Cliquet J (2001) Root exudates: a pathway for short-term N transfer from clover and ryegrass. *Plant Soil* 229:235-243. doi: 10.1023/A:1004877214831

Pelzer E., Bazot M., Makowski D., Corre-Hellou G., Naudin C., Al Rifaï M., Baranger E., Bedoussac L., Biarnès V., Boucheny P., Carrouée B., Dorvillez D., Foissy D., Gaillard B., Guichard L., Mansard M.-C., Omon B., Prieur L., Yvergnaux M., Justes E., Jeuffroy M.-H. (2012). Pea-wheat intercrops in low-input conditions combine high economic performances and low environmental impacts. *European Journal of Agronomy* 40:39-53

Peoples MB, Hauggaard-Nielsen H, Jensen ES (2009) The potential environmental benefits and risks derived from legumes in rotations. In: Emerich DW, Krishnan HB (eds) *Nitrogen Fixation in Crop Production*. American Society of Agronomy, Madison, pp. 349-385

Petit M.-S., Reau R., Dumas M., Moraine M., Omon B., Josse S. (2012). Mise au point de systèmes de culture innovants par un réseau d'agriculteurs et production de ressources pour le conseil. *Innovations Agronomiques* 20, 79-100.

Plaquette du projet ANR PerfCom. Bedoussac L., Bernard L., Brauman A., Cohan J.-P., Desclaux D., Fustec J., Haefliger M., Corre-Hellou G., Hinsinger P., Journet E.-P., Magrini M.-B., Palvadeau L., Ridaura S., Triboulet P. (2012). Les Cultures Associées céréale / légumineuse en agriculture «bas intrants» dans le Sud de la France. 28 pages.

Poggio SL (2005) Structure of weed communities occurring in monoculture and intercropping of field pea and barley. *Agric Ecosyst Environ* 109:48-58. doi: 10.1016/j.agee.2005.02.019

Prescott-Allen R, Prescott-Allen C (1990) How many plants feed the world? *Conservation Biol* 4:365-374. doi:10.1111/j.1523-1739.1990.tb00310.x

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Qin AZ, Huang GB, Chai Q, Yu AZ, Huang P (2013) Grain yield and soil respiratory response to intercropping systems on arid land. *Field Crops Res* 144:1-10. doi:10.1016/j.fcr.2012.12.005
- Raseduzzaman Md, Jensen ES (2017) Does intercropping enhance yield stability in arable crop production? A meta-analysis. *Europ J Agron* 91:25-33. Doi:10.1016/j.eja.2017.09.009
- Ratnadass A, Fernandes P, Avelino J, Habib R (2012) Plant species diversity for sustainable management of crop pests and diseases in agroecosystems: a review. *Agron Sustain Dev* 32:273-303. doi: 10.1007/s13593-011-0022-4
- Robin M, Colbach N, Lucas P, Montfort F, Cholez C, Debaeke P, Aubertot J (2013) Injury profile SIMulator, a Qualitative aggregative modelling framework to predict injury profile as a function of cropping practices, and abiotic and biotic environment. II. Proof of concept: design of IPSIMwheat-eyespot. *PLoS One*. doi: 10.1371/journal.pone.0075829
- Rosset, P.M., Machin Sosa, B., Roque Jaime, A.M., Ávila Lozano, D.R., 2011. The Campesino-to-Campesino agroecology movement of ANAP in Cuba: social process methodology in the construction of sustainable peasant agriculture and food sovereignty. *J. Peasant Stud.* 38 (1), 161 – 191. <http://dx.doi.org/10.1080/03066150.2010.538584>.
- Sadras VO, Slafer GA (2012) Environmental modulation of yield components in cereals: Heritabilities reveal a hierarchy of phenotypic plasticities. *Field Crops Research* 127:215–224. doi:10.1016/j.fcr.2011.11.014
- Sagan M, Ney B, Duc G (1993) Plant symbiotic mutants as a tool to analyse nitrogen and yield relationship in field-grown peas (*Pisum sativum* L.). *Plant Soil* 153:33-45. doi: 10.1007/BF00010542
- Salembier, C., Elverdin, J.H. & Meynard, JM. *Agron. Sustain. Dev.* (2016) 36: 1. <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0343-9>
- Samaan J, El-Khayat GH, Manthey FA, Fuller MP, Brennan CS (2006) Durum wheat quality: II. The relationship of kernel physicochemical composition to semolina quality and end product utilisation. *Int J Food Sci Technol* 41:47-55. doi: 10.1111/j.1365-2621.2006.01313.x
- Schott C., Mignolet C., Meynard J.M. (2010). Les oléoprotéagineux dans les systèmes de culture : évolution des assolements et des successions culturales depuis les années 1970 dans le bassin de la Seine., *OCL Oléagineux Corps Gras Lipides*, 17 (5), 276-291.
- Shibles RM, Weber CR (1966) Interception of solar radiation and dry matter production by various soybean planting patterns. *Crop Sci* 6:55-59. doi: 10.2135/cropsci1966.0011183X000600010017x
- Sinoquet H, Caldwell RM (1995) Estimation of light capture and partitioning in intercropping systems. In: Sinoquet H, Cruz P (eds) *Ecophysiology of tropical intercropping*. INRA, Paris, pp 79-97
- Sivakumar MV, Virmani S (1980) Growth and resource use of maize, pigeon pea and maize/pigeonpea intercrop in an operational research watershed. *Exp Agric* 16:377-386. doi: 10.1017/S0014479700012035
- Sivakumar MV, Virmani S (1984) Crop productivity in relation to interception of photosynthetically active radiation. *Agric. Forest Meteorology* 31:131-141. doi: 10.1016/0168-1923(84)90015-7

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Slafer GA, Rawson HM (1994) Sensitivity of wheat phasic development to major environmental factors: A re-examination of some assumptions made by physiologists and modellers. *Aust J Plant Physiol* 21:393-426. doi: 10.1071/PP9940393

Spitters C, Aerts R (1983) Simulation of competition for light and water in crop-weed associations. *Aspects Appl Biol* 4:467-483

Stern W (1993) Nitrogen fixation and transfer in intercrop systems. *Field Crops Res* 34:335-356. doi: 10.1016/0378-4290(93)90121-3

Townley-Smith L, Wright AT (1994) Field pea cultivar and weed response to crop seed rate in western Canada. *Can J Plant Sci* 76:907-914. doi: 10.4141/cjps94-074

Trenbath BR (1986) Resource use by intercrops. In: Francis CA (ed) *Multiple cropping systems*. MacMillan, New York, pp 57-81

Trenbath BR (1993) Intercropping for the management of pests and diseases. *Field Crops Res* 34:381-405. doi: 10.1016/0378-4290(93)90123-5

Tricot F, Crozat Y, Pellerin S (1997) Root system growth and nodule establishment on pea (*Pisum sativum* L.). *J Exp Bot* 48:1935-1941. doi: 10.1093/jxb/48.11.1935

Tsubo M, Walker S (2002) A model of radiation interception and use by a maize-bean intercrop canopy. *Agric Forest Meteorology* 110:203-215. doi: 10.1016/S0168-1923(01)00287-8

Tsubo M, Walker S, Mukhala E (2001) Comparisons of radiation use efficiency of mono-/inter-cropping systems with different row orientations. *Field Crops Res* 71:17-29. doi: 10.1016/S0378-4290(01)00142-3

Vandermeer J (1989) *The ecology of intercropping*. Cambridge university press, Cambridge

Vandermeer J (1995) The ecological basis of alternative agriculture. *Annu Rev Ecol Syst* 26:201-224. doi: 10.1146/annurev.es.26.110195.001221

Vandermeer J, van Noordwijk M, Anderson J, Ong C, Perfecto I (1998) Global change and multi-species agroecosystems: Concepts and issues. *Agric Ecosyst Environ* 67:1-22. doi: 10.1016/S0167-8809(97)00150-3

Vanloqueren G., Baret P. (2009). How agricultural research systems shape a technological regime that develops genetic engineering but locks out agroecological innovations, *Research Policy*, 38(6), 971-983.

Viguié L., Bedoussac L., Journet E.-P., Justes E. (2018). Yield gap analysis extended to marketable yield reveals agronomic and economic performances of organic lentil-spring wheat intercrops. *Agronomy for Sustainable Development* 38:39

Voisin AS, Salon C, Munier-Jolain NG, Ney B (2002) Quantitative effects of soil nitrate, growth potential and phenology on symbiotic nitrogen fixation of pea (*Pisum sativum* L.). *Plant Soil* 243:31-42. doi: 10.1023/A:1019966207970

Wacquant J, Ouknider M, Jacquard P (1989) Evidence for a periodic excretion of nitrogen by roots of grass-legume associations. *Plant Soil* 116:57-68. doi: 10.1007/BF02327257

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Wall D, Friesen GH, Bhati TK (1991) Wild mustard interference in traditional and semi-leafless field peas. *Can J Plant Sci* 71:473-480. doi: 10.4141/cjps91-064
- Weigelt A, Jolliffe P (2003) Indices of plant competition. *J Ecol* 91:707-720. doi: 10.1046/j.1365-2745.2003.00805.x
- White, P. J. & Broadley, M. R. (2009). Biofortification of crops with seven mineral elements often lacking in human diets—iron, zinc, copper, calcium, magnesium, selenium and iodine. *New Phytologist* 182(1): 49-84.
- Willey RW (1979a) Intercropping - its importance and research needs. 1. Competition and yield advantages. *Field Crop Abstr* 32:1-10
- Willey RW (1979b) Intercropping - its importance and research needs. 2. Agronomy and research needs. *Field Crop Abstr* 32:73-85
- Willey RW (1990) Resource use in intercropping systems. *Agric Water Manag* 1:215-231 doi: 10.1016/0378-3774(90)90069-B
- Willey RW, Osiru D (1972). Studies on mixtures of maize and beans (*Phaseolus vulgaris*) with particular reference to plant population. *J Agric Sci* 79:517-529. doi: 0.1017/S0021859600025909
- Williams AC, McCarthy BC (2001) A new index of interspecific competition for replacement and additive designs. *Ecol Res* 16:29-40. doi: 10.1046/j.1440-1703.2001.00368.x
- Wilson J (1988) Shoot competition and root competition. *J Appl Ecol* 25:279-296. doi: 10.2307/2403626
- Xiao, X., Cheng, Z., Meng, H., Liu, L., Li, H. & Dong, Y. (2013). Intercropping of Green Garlic (*Allium sativum* L.) Induces Nutrient Concentration Changes in the Soil and Plants in Continuously Cropped Cucumber (*Cucumis sativus* L.) in a Plastic Tunnel. *PLOS ONE* 8(4): e62173.
- Xiao Y, Li L, Zhang F (2004) Effect of root contact on interspecific competition and N transfer between wheat and fababean using direct and indirect <sup>15</sup>N techniques. *Plant Soil* 262:45-54. doi: 10.1023/B:PLSO.0000037019.34719.0d



# LISTE DES FIGURES

## LISTE DES FIGURES

Figure 1 Evolution de mon service d'enseignement au cours des années scolaires 2010-2011 à 2016-2017.....	17
Figure 2 Part des différentes formations dans mon service d'enseignement en moyenne des années scolaires 2010-2011 à 2016-2017. ....	17
Figure 3 Evolution des effectifs d'enseignants formés et volume horaire dédié à leur formation au cours des années scolaires 2010-2011 à 2016-2017.....	18
Figure 4 Représentation schématique de mes thématiques de recherche développées depuis 2006 ainsi que la liste des publications.....	30
Figure 5 Représentation schématique de l'évolution de mes thématiques de recherche ici l'évaluation du fonctionnement et des performances des cultures associées .....	31
Figure 6 Représentation schématique de l'évolution de mes thématiques de recherche ici la conception d'itinéraires techniques .....	32
Figure 7 Représentation schématique de l'évolution de mes thématiques de recherche ici l'inclusion des associations d'espèces dans les systèmes de culture.....	34
Figure 8 Représentation schématique de l'évolution de mes thématiques de recherche ici la conception de filières durables.....	34
Figure 9 Représentation schématique de l'évolution de mes thématiques de recherche ici l'intégration de différentes disciplines, échelles et acteurs .....	36
Figure 10 Nombre cumulé d'articles de rang A, de chapitres d'ouvrages, d'articles de vulgarisation et d'articles techniques publiés dans la presse agricole de 2006 à 2018. ....	40
Figure 11 Nombre cumulé de communications orales et de posters en congrès de 2006 à 2018.....	40
Figure 12 Représentation schématique de mes thématiques de recherche depuis 2006, des articles publiés, en révision et en préparation. ....	42
Figure 13 Culture associée de blé dur-pois d'hiver (en haut) et de blé dur-féverole d'hiver (en bas) dans le Sud de la France. Bedoussac et al. (2015).....	47
Figure 14 Rendement total (kg m <sup>-2</sup> ) de la culture associée (céréale + légumineuse) en fonction a) du rendement moyen des cultures pures (y = 0.95x + 0.08; R <sup>2</sup> = 0.74 ***), b) du rendement de la céréale pure (y = 0.74x + 0.11; R <sup>2</sup> = 0.48 ***) et c) du rendement de la légumineuse pure (y = 0.48x + 0.22; R <sup>2</sup> = 0.44 ***). N = 58. Bedoussac et al. (2015). ....	49

## LISTE DES FIGURES

<p>Figure 15 Concentration en protéines dans les grains (en % du poids sec) dans les cultures associées en fonction de celle en culture pure pour (a) la céréale (<math>y = 0.85*x + 2.77</math>; <math>R^2 = 0.69^{***}</math>) et (b) la légumineuse (<math>y = 0,99*x + 0,28</math>; <math>R^2 = 0,84^{***}</math>). La concentration en protéines céréalières a été calculée en multipliant la teneur en azote par 6,25 pour la légumineuse et l'orge (consommation animale) et par 5,7 pour le blé (consommation humaine). N = 58. Bedoussac et al. (2015).....</p>	50
<p>Figure 16 Biomasse des adventices à la récolte (<math>\text{kg m}^{-2}</math>) dans la culture associée en fonction de (a) la céréale pure (<math>y = 0.86*x</math>; <math>R^2 = 0.59^{***}</math>) et (b) de la légumineuse pure (<math>y = 0.26*x</math>; <math>R^2 = 0.47^{**}</math>). N = 43. Bedoussac et al. (2015). .....</p>	51
<p>Figure 17 Dynamique de la couverture du sol par l'association blé dur-pois d'hiver. Bedoussac et al. (2015) .....</p>	51
<p>Figure 18 Evolution du nombre de pucerons par plante de pois d'hiver en culture pure et en association avec le blé dur.....</p>	52
<p>Figure 19 Analyse du « Yield gap » pour les associations blé-lentille et lentilles pures. Les barres correspondent à : (i) la masse de grains consommée par les bruches (rouge foncé), (ii) la masse de grains bruchés éliminée lors de la récolte (rouge) et los du nettoyage des grains (rouge clair), (iii) la masse de grains sains perdus lors de la récolte (blanc), (iv) la masse de grains commercialisable de blé (hachuré) et de lentille (noir). N = 16 pour les associations et N = 8 pour les lentilles pures. ....</p>	54
<p>Figure 20 Marge brute calculée en considérant le coût des semences, du tri, de la récolte et une prime qualité pour (a) la culture associée en fonction de la moyenne des cultures pures (<math>y = 0,93*x + 166,12</math>; <math>R^2 = 0,70^{***}</math>), (b) la culture associée en fonction de la céréale pure (<math>y = 0,68*x + 350,09</math>; <math>R^2 = 0,25^{***}</math>) et (c) la culture associée en fonction de la légumineuse pure (<math>y = 0,53*x + 365,83</math>; <math>R^2 = 0,61^{***}</math>). N = 56. Bedoussac et al. (2015). .....</p>	55
<p>Figure 21 Répartition des coopératives en fonction de leur compatibilité logistique pour les cultures associées et leur score calculé par une méthode d'analyse multicritères basée sur le calcul de la somme pondérée d'un ensemble de critères en considérant dix critères identifiés lors d'entretiens et apparaissant comme des déterminants de l'orientation donnée à la gestion logistique.....</p>	56
<p>Figure 22 Teneur en azote minéral du sol à la récolte (<math>\text{g N m}^{-2}</math>) après la culture associée en fonction de après (a) la céréale pure (<math>y=1.16*x</math>; <math>R^2=0.95^{***}</math>) et (b) la légumineuse pure (<math>y=0.86*x</math>; <math>R^2=0.80^{***}</math>). N = 25. Bedoussac et al. (2015). .....</p>	57
<p>Figure 23 Energie consommée par tonne de grain récoltée en matière sèche (<math>\text{MJ Mg}^{-1}</math>) pour le pois pur non fertilisé (P), le blé pur fertilisé (WP), le blé pur non fertilisé (W0), l'association blé-pois fertilisée (WP) et l'association blé-pois non fertilisée (WP0). Les figures représentent : la moyenne (étoile), la médiane (traits horizontaux épais), les premiers et quatrièmes quartiles (traits fins horizontaux), les observations minimales et maximales (petits traits fins horizontaux) et les observations aberrantes (rond).....</p>	58



## LISTE DES FIGURES

Figure 24 Land equivalent ratio partiel de la légumineuse calculé sur le rendement ( $LER_{Yield-Legume}$ ) en fonction de celui de la céréale ( $LER_{Yield-Cereal}$ ). N = 58. Bedoussac et al. (2015).....	62
Figure 25 Rendement de la légumineuse associée ( $kg\ m^{-2}$ ) en fonction du rendement de la céréale associée ( $y = -0,08*\ln(x) - 0,01$ ; $R^2 = 0,20$ ***). N = 58. Bedoussac et al. (2015). .....	64
Figure 26 Rapport entre le rendement de la céréale et de la légumineuse en culture associée en fonction (a) de celui en cultures pures ( $y = 0,77*x + 1,10$ ; $R^2 = 0,63$ ***) et (b) de celui en cultures pures corrigé par la densité relative des espèces en association en pourcentage de la densité en culture pure ( $y = 0,40*x + 1,27$ ; $R^2 = 0,70$ ***). N = 58. Bedoussac et al. (2015).....	64
Figure 27 (a) Pourcentage d'azote issu de la fixation symbiotique en culture associée en fonction de celui en culture pure ( $y=0.86*x+22.00$ ; $R^2=0.62$ ***) et (b) quantité d'azote issue de la fixation symbiotique ( $g\ N\ m^{-2}$ ) en association en fonction de celui en culture pure ( $y=0.51*x+0.85$ ; $R^2=0.71$ ***). N = 43. Bedoussac et al. (2015).....	66
Figure 28 Evolution de la biomasse aérienne ( $t\ ha^{-1}$ ) et Evolution de la fraction de PAR absorbée (%) du blé et du pois en culture pure (SC) et en culture associée (IC) pour différents niveaux de fertilisation azotée ( $Nx$ où 'x' représente la quantité d'azote minérale appliquée en $kg\ N\ ha^{-1}$ ). Les valeurs sont la moyenne de $n=3$ à 5. Pour chaque date de prélèvement les barres verticales au-dessus des figures correspondent aux écart-types successivement pour le total de l'association, le blé associé, le pois associé, le blé pur et le pois pur. Les astérisques indiquent les dates des apports d'engrais. Les courbes correspondent à des ajustements non linéaires selon : $FPAR_a = FPAR_{max} \times \exp(K1 \times (t-K2)) / (1 + \exp(K1 \times (t-K2)))$ .....	68
Figure 29 Land equivalent ratio calculé à partir du rendement en fonction du rendement moyen des cultures pures ( $kg\ m^{-2}$ ; $y=0.84*x-0.28$ ; $R^2=0.34$ ***). N = 56. Bedoussac et al. (2015).....	69
Figure 30 Land equivalent ratio en fonction de la quantité d'azote acquise par la céréale dans les parties aériennes ( $g\ N\ m^{-2}$ ; $y=2.59*x-0.18$ ; $R^2=0.12$ **). N = 56. Bedoussac et al. (2015). .....	70
Figure 31 Land equivalent ratio partiel de la céréale calculé sur la base de la teneur en protéines des grains en fonction de celui calculé sur la base rendement ( $y=1.06*x-0.16$ ; $R^2=0.34$ ***). N = 56. Bedoussac et al. (2015).....	71
Figure 32 Teneur en protéines des grains (GPC) de la céréale estimée en fonction de la teneur en protéines des grains observée ( $y=0.82*x+2.05$ ; $R^2=0.82$ ***) en considérant le modèle linéaire suivant : $GPC_{Cereal-Associée} = a * GPC_{Cereal-Pure} + b * LER_{Yield-Cereal} + c$ avec $a=0.90$ ; $b=-3.35\%$ ; $c=4.56\%$ ; $RMSE=0.73\%$ et $Biais=0.00\%$ . N = 56. Bedoussac et al. (2015).....	71
Figure 33 Relation entre la concentration en protéines du blé dur (% du poids sec) en culture associée (IC) en fonction de celle en culture pure (SC) pour différents niveaux de fertilisation azoté ( $Nx$ où 'x' représente la quantité d'azote minérale apportée en $kg\ N\ ha^{-1}$ ) pour deux expérimentations. La régression linéaire a été obtenue en incluant tous les traitements. (**) indique que la régression linéaire est significative à $P = 0,01$ . Les valeurs sont les moyennes de $n = 3$ à $5 \pm$ erreur standard. La première bissectrice $y = x$ et la régression $y = 1.2*x$ sont indiquées afin d'illustrer l'augmentation de la concentration en protéines des grains en association par rapport à la culture pure. ....	74

## LISTE DES FIGURES

Figure 34 Croissance du blé et établissement des composantes du rendement. Les lignes pointillées indiquent les périodes de différenciation ou de croissance des composantes du rendement du blé (plantes par graine, talles par plante, épis par talle, grains par épi et poids individuel des grains). Les lignes pleines indiquent des périodes de différenciation ou de croissance des composantes cumulées par m <sup>2</sup> (plantes m <sup>2</sup> , talles m <sup>2</sup> , épis m <sup>2</sup> , grains m <sup>2</sup> et rendement m <sup>2</sup> ). Adapté de Slafer et Rawson (1994).....	76
Figure 35 Représentation schématique de mon projet de recherche : axes, hypothèses, collaborations et relations entre thématiques.....	80
Figure 36 Positionnement dans la continuité des travaux précédents de l'axe 1 de mon projet de recherche et des deux hypothèses principales auxquelles cet axe cherchera à répondre. ....	85
Figure 37 Illustration de la diversité de cultures associées pratiquées par 28 agriculteurs interviewés en amont des 4 ateliers de co-conception réalisés en 2018 dans le Sud-Ouest dans le projet ReMIX. Les cultures associées sont classées selon les principales espèces.....	85
Figure 38 Thèmes identifiés comme des freins à la pratique des cultures associées par 28 agriculteurs lors d'ateliers de co-conception réalisés en 2018 dans le Sud-Ouest de la France. La taille des bulles est proportionnelle au nombre d'occurrences chaque agriculteur disposant de cinq votes. ....	86
Figure 39 Positionnement dans la continuité des travaux précédents de l'axe 2 de mon projet de recherche et des deux hypothèses principales auxquelles cet axe cherchera à répondre. ....	91
Figure 40 Représentation schématique du dispositif expérimental visant à évaluer la performance de six systèmes de culture présentant des niveaux de rupture croissants.....	96
Figure 41 Interactions entre criblage/sélection de variétés et les différents axes et hypothèses de mon projet de recherche.....	98
Figure 42 Positionnement dans mon projet de recherche de la modélisation comme outil d'aide à la conception d'itinéraires techniques et au criblage de variétés adaptées. ....	99
Figure 43 Représentation schématique des thématiques de recherche développées depuis 2006 et de mon projet de recherche (axes, hypothèses, collaborations et relations entre thématiques) ainsi que la liste des publications acceptées, en révision et en préparation. ....	101



# LISTE DES DES ENCADRES

## LISTE DES ENCADRES

Encadré 1 Résumé de l'article publié en 2014 dans <i>Journal of Applied Entomology</i> 138(8) 577:585 visant à évaluer la capacité des cultures associées blé dur-pois d'hiver à réduire la présence du puceron vert du pois ( <i>Acyrtosiphon pisum</i> Harris). .....	52
Encadré 2 Résumé de l'article publié en 2018 dans <i>Agronomy for Sustainable Development</i> 38:39 sur l'extension du yield gap .....	54
Encadré 3 Résumé de l'article publié en 2013 dans <i>Economie rurale</i> 338:25-45 sur la logistique des coopératives et l'acceptabilité des cultures associées blé dur-légumineuses.....	56
Encadré 4 Résumé de l'article publié en 2012 dans <i>European Journal of Agronomy</i> 40 :39-53 visant à évaluer la performance économique et environnementale des associations blé-pois.....	58
Encadré 5 Résumé de l'article publié en 2011 dans la revue <i>Field Crops Research</i> 124:25-36 comparant divers indices largement utilisés pour évaluer l'efficacité des cultures associées et les interactions entre espèces.....	63
Encadré 6 Résumé de l'article publié en 2010 dans <i>Plant and Soil</i> 330:37-54 visant à analyser la dynamique des compétitions et des complémentarités pour l'utilisation de la lumière et de l'azote dans des associations de blé dur-pois d'hiver.....	68
Encadré 7 Résumé de l'article publié en 2010 dans <i>Plant and Soil</i> 330:19-35 visant à évaluer l'effet de la disponibilité en azote sur la performance des cultures associées blé dur-pois d'hiver en termes de rendement et de teneur en protéines. ....	74
Encadré 8 Résumé de l'article soumis à <i>Field Crop Research</i> en 2018 actuellement en révision portant sur le développement d'une méthode basée sur l'analyse des composantes du rendement pour évaluer la dynamique des compétitions inter- et intraspécifiques.....	76

# PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES (ARTICLES ET CHAPITRES)

## Articles acceptés dans des revues avec comité de lecture

1. **Chemoecology** 17(3):163-167. **Bedoussac L.**, Favila M. E., López R. M. (2007). Defensive volatile secretions of two diploid species attract the carrion ball roller scarab *Canthon morsei* (Coleoptera: Scarabaeidae).
2. **Plant and Soil** 330(1):37-54. **Bedoussac L.**, Justes E. (2010). 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.
3. **Plant and Soil** 330(1):19-35. **Bedoussac L.**, Justes E. (2010). The efficiency of a durum wheat-winter pea intercrop to improve yield and wheat grain protein concentration depends on N availability during early growth.
4. **Field Crops Research** 124:25-36. **Bedoussac L.**, Justes E. (2011). A comparison of commonly used indices for evaluating species interactions and intercrop efficiency: application to durum wheat-winter pea intercrops.
5. **European Journal of Agronomy** 40:39-53. Pelzer E., Bazot M., Makowski D., Corre-Hellou G., Naudin C., Al Rifai M., Baranger E., **Bedoussac L.**, Biarnès V., Boucheny P., Carrouée B., Dorvillez D., Foissy D., Gaillard B., Guichard L., Mansard M.-C., Omon B., Prieur L., Yvergnaux M., Justes E., Jeuffroy M.-H. (2012). Pea-wheat intercrops in low-input conditions combine high economic performances and low environmental impacts.
6. **Economie rurale** 338:25-45. Magrini M.-B., Triboulet P., **Bedoussac L.** (2013). Pratiques agricoles innovantes et logistique des coopératives agricoles. Une étude ex-ante sur l'acceptabilité de cultures associées blé dur-légumineuses.
7. **Journal of Applied Entomology** 138(8) 577:585. Ndzana R. A., Magro A., **Bedoussac L.**, Justes E., Journet E.-P., Hemptinne J.-L. (2014). Is there an associational resistance of winter pea - durum wheat intercrops towards *Acyrtosiphon pisum* Harris?
8. **Advances in agronomy** 130:337-419. Mikić A., Čupina B., Rubiales D., Mihailović V., Šarūnaitė L., Fustec J., Antanasović S., Krstić D., **Bedoussac L.**, Zorić L., Đorđević V., Perić V., Srebrić M. (2015). Models, developments and perspectives of mutual legume intercropping.
9. **Agronomy for sustainable development** 35(3):911-935. **Bedoussac L.**, Journet E.-P., Hauggaard-Nielsen H., Naudin C., Corre-Hellou G., Jensen E. S., Prieur L., Justes E. (2015). Ecological principles underlying the increase of productivity achieved by cereal-grain legume intercrops in organic farming. A review.
10. **Sustainable Agricultural Research** 4(3):42-50. Jensen E. S., **Bedoussac L.**, Carlsson G., Journet E.-P., Justes E., Hauggaard-Nielsen H. (2015). Enhancing Yields in Organic Crop Production by Eco-Functional Intensification.
11. **OCL** 24(3), D304. Debaeke P., **Bedoussac L.**, Bonnet C., Bret-Mestries E., Seassau C., Gavaland A., Raffailac D., Tribouillois H., Vericel G., Justes E. (2017). Sunflower crop: environmental-friendly and agroecological
12. **Soil and Tillage research** 176:26-35. Yao Z., Wang Z., Li J., **Bedoussac L.**, Zhang S., Li Y., Cao W., Zhai B., Wang Z., Gao Y. (2018). Screen for sustainable cropping systems in the rain-fed area on the Loess Plateau of China.
13. **International Journal of Agricultural and Environmental Information Systems** 9(3):1-21. Thomopoulos R., Moulin B., **Bedoussac L.** (2018). Supporting decision for environment-friendly practices in the agri-food sector: when argumentation and system dynamics simulation complete each other.
14. **Agronomy for Sustainable Development** 38:39. Viguier L., **Bedoussac L.**, Journet E.-P., Justes E. (2018). Yield gap analysis extended to marketable yield reveals agronomic and economic performances of organic lentil-spring wheat intercrops

Articles en révision dans des revues avec comité de lecture

1. **European Journal for agronomy.** Falconnier G., Journet E.-P., **Bedoussac L.**, Vermue A., Chlebowski F., Beaudoin N., Justes E. Modelling faba bean with the STICS soil-crop model: Parameterization and independent validation
2. **Field Crop Research.** **Bedoussac L.**, Journet E.-P., Justes E. An original method based on yield components analysis to assess intraspecific, interspecific and G x E interactions in intercrops: application to durum wheat - winter pea bispecific mixtures

Articles en préparation pour être soumis à des revues avec comité de lecture

- A1. **Bedoussac L.**, Kammoun B., Justes E., Journet E.-P. Evaluating the effect of cultivar diversity on competitive interactions and yield performance in durum wheat-grain legumes intercrops.
- A2. Zhao J, Sun J, Che Z, Bao X, Chen W, Li W, **Bedoussac L.**, Li L. Recovery growth and yield of maize in intercropping depend on companion specie, co-growth duration and nitrogen supply
- A3. Bonnet C., Gaudio N., **Bedoussac L.**, Justes E. et al. Evaluation multicritères de systèmes de culture diversifiés conçus pour réduire la dépendance aux intrants azotés et aux pesticides
- A4. **Bedoussac L.**, Hily Y., Joubert M., Lullien-Pellerin V., Morel M.-H., Justes E. Producing qualitative and quantitative pasta with low-input innovative durum wheat crop management: yes we can
- A5. Viguiet L., Journet E.-P., Justes E., **Bedoussac L.** Species niche complementarity for nitrogen improves lentil-wheat intercrop grain production in organic farming
- A6. Viguiet L., Journet E.-P., Justes E., **Bedoussac L.** Explaining lentil-spring wheat intercrops grain yield through yield component analysis
- A7. Falconnier G., Vermue A., Journet E.-P., **Bedoussac L.**, Justes E. Increase in grain legume yield and N<sub>2</sub> fixation with climate change and CO<sub>2</sub> enrichment in a temperate Mediterranean climate.

Chapitres d'ouvrage

1. **Sustainable Agriculture Reviews: Genetics, Biofuels and Local Farming Systems 7:347-365.** Čupina B., Mikić A., Stoddard F. L., Krstić D., Justes E., **Bedoussac L.**, Fustec J., Pejić B. (2011). Mutual legume intercropping for forage production in temperate regions.
2. **Organic farming, prototype for sustainable agricultures, Bellon S. et Penvern S. (eds), Springer, 47-64.** **Bedoussac L.**, Journet E.-P., Hauggaard-Nielsen H., Naudin C., Corre-Hellou G., Prieur L., Jensen E. S., Justes E. (2014). Eco-Functional Intensification by Cereal-Grain Legume Intercropping in Organic Farming Systems for Increased Yields, Reduced Weeds and Improved Grain Protein Concentration
3. **Advances in Artificial Intelligence: From Theory to Practice, 30th International Conference on Industrial Engineering and Other Applications of Applied Intelligent Systems, Part II, S. Benferhat et al. (ed), Springer, 275–281.** Thomopoulos R., Moulin B., **Bedoussac L.** (2017). Combined Argumentation and Simulation to Support Decision: Example to Assess the Attractiveness of a Change in Agriculture.
4. **Guide de la fertilisation raisonnée 2<sup>ème</sup> édition, Editions France Agricole, 541-545.** **Bedoussac L.**, Journet E.-P., Hinsinger P., Justes E. (2017). Des cultures associées pour une gestion économe de l'azote et du phosphore dans les agroécosystèmes.
5. **Achieving sustainable cultivation of grain legumes Volume 1: Advances in breeding and cultivation techniques, Sivasankar, S. et al. (ed.), Burleigh Dodds Science Publishing, Cambridge, UK, Part 2 Cultivation Chapter 11.** **Bedoussac L.**, Journet E.-P., Hauggaard-Nielsen H., Naudin C., Corre-Hellou G., Jensen E. S., Justes E. (2018). Ensuring sustainable grain legume-cereal cropping systems



## Articles acceptés dans des revues avec comité de lecture non référencées

1. **Italian Journal of Agronomy 3(3S):637-638. Bedoussac L.,** Matura M., Dehant E., Hemptinne J.-L., Justes, E. (2008). Is durum wheat-winter pea intercropping efficient to reduce pests and diseases?
2. **Italian Journal of Agronomy 3(3S):173-174. Bedoussac L.,** Justes E. (2008). The efficiency of durum wheat and winter pea intercropping to increase wheat grain protein content depends on nitrogen availability and wheat cultivar
3. **Innovations agronomiques 4:165-176. Justes E., Bedoussac L.,** Prieur L. (2009). Est-il possible d'améliorer le rendement et la teneur en protéines du blé en Agriculture Biologique au moyen de cultures intermédiaires ou de cultures associées ?
4. **Innovations agronomiques 30:41-57. Corre-Hellou G., Bedoussac L.,** Bousseau D., Chaigne G., Chataigner C., Celette F., Cohan J.-P., Coutard J.-P., Emile J.-C., Floriot M., Foissy D., Guibert S., Hemptinne J.-L., Le Breton M., Lecompte C., Marceau C., Mazoué F., Mérot E., Métivier T., Morand P., Naudin C., Omon B., Pambou I., Pelzer E., Prieur L., Rambaut G, Tauvel O. (2013). Associations céréale-légumineuses multi-services.
5. **Innovations agronomiques 32:199-212. Bedoussac L.,** Triboulet P., Magrini M.-B., Rambaut G., Foissy D., Corre-Hellou G. (2013). Conséquences de l'introduction des cultures associées dans les filières. Analyse du point de vue des agriculteurs et des coopératives.
6. **Legume perspectives 1:45-46. Bedoussac L.,** Champclou D., Tribouillois H., Vericel G., Lande N., Justes E. (2013) Soybean intercropped with sunflower is an efficient solution to increase global grain production in low input systems.
7. **Innovations agronomiques 40:1-24. Justes E., Bedoussac L.,** Hinsinger P., Journet E.-P., Louarn G., Naudin C., Pelzer E. (2014). Les processus de complémentarité de niche et de facilitation déterminent le fonctionnement des associations végétales et leur efficacité pour l'acquisition des ressources abiotiques.
8. **Innovations agronomiques. 40:25-42. Corre-Hellou G.,** Baranger A., **Bedoussac L.,** Cassagne N., Cannavacciuolo M., Fustec J., Pelzer E., Piva G. (2014). Interactions entre facteurs biotiques et fonctionnement des associations végétales.
9. **Innovations agronomiques 40:73-91. Pelzer E., Bedoussac L.,** Corre-Hellou G., Jeuffroy M.-H., Métivier T., Naudin C. (2014). Association de cultures annuelles combinant une légumineuse et une céréale : retours d'expériences d'agriculteurs et analyse.
10. **Agricultural Research & Technology 12(2). Bedoussac L.,** Tribouillois H., Plaza-Bonilla D., Journet E.-P., Justes E. (2017). Designing and evaluating arable cropping systems with cash and cover crop legumes in sole crop and intercrop to improve nitrogen use efficiency.
11. **Innovations agronomiques 62:17-32. Tribouillois H., Bedoussac L.,** Couëdel A., Justes E. (2017). Acquisition des ressources et production de services écosystémiques par les mélanges bi-spécifiques de cultures intermédiaires.
12. **PHLOEME 2018. Joubert M., Morel M.-H., Samson M.-F.,** Thomas R., Justes E., Leygue J.-P., **Bedoussac L.,** Lullien-Pellerin V. (2018). Impact de la variabilité de blés durs issus d'itinéraires techniques innovants sur leur aptitude à la transformation.

# COMMUNICATIONS ORALES

## COMMUNICATIONS ORALES

- 1. 15th Nitrogen Workshop, Towards a better efficiency in N use (Spain)**  
**Bedoussac L., Justes E. (2007).** Is durum wheat – winter pea intercropping efficient to improve the use of N in low input farming?
- 2. DINABIO : Les recherches en Agriculture Biologique (France)**  
Justes E., Prieur L., **Bedoussac L.**, Hemptinne J.-L. (2008). Est-il possible d'améliorer le rendement et la teneur en protéines du blé cultivé en agriculture biologique au moyen de cultures intermédiaires ou de cultures associées ?
- 3. Farming systems design, Methodologies for integrated analysis on farm production systems (United States)**  
Justes E., Hauggaard-Nielsen H., **Bedoussac L.**, Corre-Hellou G., Jeuffroy M.-H., Nolot J.-M. Jensen E.S. (2009). Designing and evaluating prototypes of arable cropping systems with legume sole cropping or intercropped aimed at improving N use efficiency in low input farming.
- 4. 11th Congress of European Society for Agronomy (France)**  
**Bedoussac L., Journet E.-P., Rouet P., Justes E. (2010).** Durum Wheat-Grain Legume intercrops: an innovative way to design low inputs cropping systems.
- 5. 5th International Food Legumes Research Conference and 7th European Conference on Grain Legumes (Turkey)**  
**Bedoussac L., Justes E. (2010).** Increasing pea N<sub>2</sub> fixation by intercropping with durum wheat to improve the cereal grain protein concentration.
- 6. 48<sup>ème</sup> colloque de l'Association Régionale de Science de Langue Française (France)**  
Magrini M.-B., Triboulet P., **Bedoussac L.** (2011). Impacts des systèmes agricoles innovants sur les filières agro-industrielles : une étude sur les capacités logistiques des coopératives agricoles pour valoriser les cultures associées blé dur-légumineuse.
- 7. 12<sup>th</sup> Congress of European Society for Agronomy (Finland)**  
**Bedoussac L., Journet E.-P., Tribouillois H., Véricel G., Landé N., Justes E. (2012).** Is intercropping an efficient solution to design low input systems? A synthesis of durum wheat-grain legume and sunflower-soybean intercrops results.
- 8. 6<sup>th</sup> Congress of Mediterranean Society of Comparative Education (Tunisia)**  
Murillo A., **Bedoussac L.**, B. Fraysse (2012). Former à des pratiques agricoles innovantes : savoir expérientiel du formateur et légitimations en situation de formation.
- 9. 3<sup>ème</sup> journée d'études sur les dynamiques territoriales vers l'AB et l'écologisation des systèmes agri-alimentaires (France)**  
Triboulet P., Magrini M.-B., **Bedoussac L.** (2013). Coordination d'acteurs et freins à l'adoption de pratiques innovantes au sein des filières agro-alimentaires : réflexions à partir de l'étude de la filière blé dur.
- 10. Séminaire d'animation scientifique : « Des ingénieries par et pour le vivant, écologiques et agro-écologiques » (France)**  
Justes E., Pelzer E., **Bedoussac L.**, Cruz P., Jeuffroy M.-H., Journet E.-P., Kammoun B., Lorin M., Tribouillois H., Valantin-Morison M. (2013). Cultures associées et cultures intermédiaires plurispécifiques : une application des principes de l'agro-écologie pour valoriser les ressources naturelles et produire divers services écosystémiques.
- 11. DINABIO 2013 (France)**  
**Bedoussac L., Triboulet P., Magrini M.-B., Rambault G., Foissy D., Corre-Hellou G. (2013).** Conséquences de l'introduction des cultures associées dans les filières : analyse du point de vue des agriculteurs et des coopératives.
- 12. First Legume Society Conference (Serbia)**  
**Bedoussac L., Magrini M.-B., Triboulet P. (2013).** Agricultural innovative practices and impacts of the supply chain: An ex-ante study of the logistics of agricultural cooperatives to estimate the acceptability of durum wheat-grain legumes intercrops.
- 13. First Legume Society Conference (Serbia)**  
**Bedoussac L., Journet E.-P., Tribouillois H., Vericel G., Champclou D., Lande N., Justes E. (2013).** Are durum wheat-grain legume and sunflower-soybean intercropping efficient solutions to produce legume in low input systems?
- 14. Innovations in organic food systems for Sustainable Production and Enhanced Ecosystem Services (United States)**

## COMMUNICATIONS ORALES

- Jensen E.S., Carlsson G., **Bedoussac L.**, Journet E.-P., Justes E., Hauggaard-Nielsen H. (2014). Enhanced yields in organic crop production through crop diversification intensifying the role of eco-functionality.
15. **5th International Symposium Phosphorus in Soils and Plants (France)**  
Journet E.-P., **Bedoussac L.**, Betencourt E., Campguilhem J., Hinsinger P., Justes E. (2014). Is P acquisition facilitated by intercropping of durum wheat and grain legumes in field conditions?
  16. **4th Sustainable Phosphorus Summit (France)**  
Journet E.-P., **Bedoussac L.**, Betencourt E., Campguilhem J., Hinsinger P., Justes E. (2014). Facilitation of P acquisition by intercropping cereal and grain legumes in field conditions
  17. **18th Nitrogen Workshop (Portugal)**  
**Bedoussac L.**, Journet E.-P., Hauggaard-Nielsen H., Naudin C., Corre G., Prieur L., Jensen E.S., Justes E. (2014). Intercropping legume and non-legume, an innovative way to valorize N<sub>2</sub> fixation and soil mineral N sources in low inputs cropping systems.
  18. **Carrefours de l'Innovation Agronomique (France)**  
Justes E., **Bedoussac L.**, Hinsinger P., Journet E.-P., Louarn G., Naudin C., Pelzer E. (2014). Les processus de complémentarité de niche et de facilitation déterminent le fonctionnement des associations végétales et leur efficacité pour l'acquisition des ressources abiotiques.
  19. **Carrefours de l'Innovation Agronomique (France)**  
Pelzer E., **Bedoussac L.**, Corre-Hellou G., Jeuffroy M.-H., Métivier T., Naudin C. (2014). Association de cultures annuelles combinant une légumineuse et une céréale : retours d'expériences d'agriculteurs et analyse.
  20. **Carrefours de l'Innovation Agronomique (France)**  
Corre-Hellou G., Baranger A., **Bedoussac L.**, Cassagne N., Cannavacciuolo M., Fustec J., Pelzer E., Piva G. (2014). Interactions entre facteurs biotiques et fonctionnement des associations végétales.
  21. **International Workshop of Intercropping for Agronomy and Ecology (China).**  
**Bedoussac L.**, Journet E.-P., Justes E., Hauggaard-Nielsen H., Naudin C., Corre-Hellou G., Prieur L., Jensen E.S., Fustec J., Hinsinger P., Jeuffroy M.-H., Louarn G., Pelzer E., Magrini M.-B., Triboulet P. (2015). Intercropping cereal and grain legume 10 years of experiments from field to plate.
  22. **19th Nitrogen Workshop (Sweden)**  
**Bedoussac L.**, Tribouillois H., Plaza-Bonilla D., Journet E.-P., Justes E. (2016). Designing and evaluating arable cropping systems with cash and cover crop legumes in sole crop and intercrop to improve nitrogen use efficiency.
  23. **EcoSummit 2016 (France)**  
Jensen E.S., Carlsson C., **Bedoussac L.**, Journet E.-P., Justes E., Hauggaard-Nielsen H. (2016). "Ecological precision farming" - reintegrating spatial crop diversity and ecological principles in agricultural cropping systems.
  24. **2nd international legume society conference (Portugal)**  
Thomopoulos R., **Bedoussac L.**, Moulin B. (2016). Evaluating cereal-legume intercrops towards sole crops by combining argumentation and simulation
  25. **2nd international legume society conference (Portugal)**  
Viguié L., **Bedoussac L.**, Journet E.-P., Justes E. (2016). Intercropping lentil with spring wheat to improve productivity and income in organic farming
  26. **2nd international legume society conference (Portugal)**  
Justes E., Plaza-Bonilla D., **Bedoussac L.**, Gavaland A., Journet E.P., Léonard J., Mary B., Nolot J.M., Perrin P., Peyrard C., Raffailac D., Tribouillois H. (2016). Synthesis on the effects of grain legume insertion and cereal-grain legume intercrops in low input cropping systems in Southern France.
  27. **Carrefours de l'Innovation Agronomique (France)**  
**Bedoussac L.**, Tribouillois H., Charles R., Couëdel A., Justes E. (2017). Complémentarité et facilitation entre espèces pour l'acquisition des ressources et la production de services écosystémiques
  28. **Congress of the European Federation for Information Technology in Agriculture, Food and the Environment with the collaboration of the World Congress on Computers in Agriculture (France)**  
Thomopoulos R., Moulin B., **Bedoussac L.** (2017). Combining Argumentation and System Dynamics Simulation for Decision Support in the Agri-food Sector

29. **30th International Conference on Industrial, Engineering, Other Applications of Applied Intelligent Systems (France)**  
Thomopoulos R., Moulin B., Bedoussac L. (2017). Combined Argumentation and Simulation to Support Decision
30. **International Conference on advances in grain legume cultivation and use (Serbia)**  
Carlsson G, **Bedoussac L**, Cupina B, Djordjevic V, Gaudio N, Jensen ES, Jeuffroy M-H, Journet E-P, Justes E, Mikic A, Pelzer E, Zivanov D (2017). Does a mixture of pea varieties with different leaf morphology improve crop performance?
31. **Colloque d'hiver de l'AFPSVT ; Question scientifique socialement vive : Nourrir l'humanité (France)**  
**Bedoussac L.** (2018). Les cultures associées du champ à l'assiette : approche multi-acteurs pour lever les contraintes de chacun
32. **PHLOEME 2018, 1<sup>ères</sup> Biennales de l'innovation céréalière**  
Joubert M., Morel M.-H., Samson M.-F., Thomas R., Justes E., Leygue J.-P., **Bedoussac L.**, Lullien-Pellerin V. (2018). Impact de la variabilité de blés durs issus d'itinéraires techniques innovants sur leur aptitude à la transformation.
33. **Colloque de restitution du projet ANR Legitimes**  
**Bedoussac L.**, Tribouillois H., Plaza-Bonilla D., Journet E.-P., Justes E. (2018). Evaluation de systèmes de culture avec et sans légumineuses.
34. **15th Congress of European Society for Agronomy (Switzerland)**  
Viguiet L., **Bedoussac L.**, Journet E.-P., Justes E. (2018). Yield gap analysis extended to marketable grain reveals the profitability of organic lentil-spring wheat intercrops
35. **15th Congress of European Society for Agronomy (Switzerland)**  
Justes E., Alletto L., **Bedoussac L.**, Bonnet C., Couedel A., Gavaland A., Journet E.-P., Plaza-Bonilla D., Raffailac D., Viguiet L. (2018). Towards agroecological cropping systems: the role of diversification in time and space for supporting the crop production
36. **15th Congress of European Society for Agronomy (Switzerland)**  
Falconnier G, Vermue A, Journet E.-P., **Bedoussac L.**, Justes E. (2018). Assessment of the impact of climate change in temperate zone on grain legume yield and N<sub>2</sub> fixation
37. **International conference on ecological sciences (France)**  
Mahmoud R., Gaudio N., Casadebaig P., Gendre X., **Bedoussac L.**, Corre-Hellou G., Fort F., Journet E.-P., Litrico I., Naudin C., Violle C. (2018). A trait-based approach to understand and predict the behavior of arable annual mixed crops.
38. **Rencontres francophones légumineuse 2 (France)**  
Verret V., Pelzer E., **Bedoussac L.**, Jeuffroy M.-H. (2018). Traque aux innovations pour aider à la conception d'associations de culture incluant des légumineuses
39. **Rencontres francophones légumineuse 2 (France)**  
Viguiet L., **Bedoussac L.**, Journet E.-P., Justes E. (2018). L'extension du concept du "Yield gap" au rendement commercialisable révèle la profitabilité des associations lentille-blé de printemps en agriculture biologique

# POSTERS

## POSTERS

1. **9th Congress of European Society for Agronomy (Poland)**  
**Bedoussac L., Justes E.** (2006). Is durum wheat – winter pea intercropping efficient to improve the use of light and N resources in low-input farming?
2. **6th European Conference on grain legumes (Portugal)**  
**Bedoussac L., Justes E.** (2007). Durum wheat – winter pea intercropping is efficient to improve the use of environmental resources in low input farming in the French southern conditions.
3. **15th Nitrogen Workshop, Towards a better efficiency in N use (Spain)**  
**Bedoussac L., Justes E.** (2007). Is ‘durum wheat – winter pea intercropping’ efficient to improve the use of N in low input farming?
4. **10th Congress of European Society for Agronomy (Italy)**  
**Bedoussac L., Matura M., Hemptinne J.-L., Justes E.** (2008). Is durum wheat – winter pea intercropping efficient to reduce pests and diseases?
5. **10th Congress of European Society for Agronomy (Italy)**  
**Bedoussac L., Justes E.** (2008). The efficiency of durum wheat and winter pea intercropping to increase wheat grain protein content depends on nitrogen availability and wheat cultivar.
6. **International Congress Ecological Engineering “from concepts to applications” (France)**  
**Bahri H., Annabi M., Ouerghi K., Rumpel C., Bedoussac L., Justes E., Latiri K.** (2009). Intercropping, a system allowing to increase durum wheat production and to maintain soil fertility in Northern Tunisia?
7. **Farming systems design, Methodologies for integrated analysis on farm production systems (United States)**  
**Bedoussac L., Justes E.** (2009). Intercropping, an application of ecological principles to increase yield and durum wheat grain protein in low nitrogen input systems.
8. **5th International Food Legumes Research Conference and 7th European Conference on Grain Legumes (Turkey)**  
**Bedoussac L., Justes E.** (2010). Intercropping winter pea with durum wheat to reduce legume pests and diseases.
9. **18<sup>th</sup> International Sunflower Conference (Argentina)**  
**Landé N., Jouffret P., Tribouillois H., Cristante P., Estragnat A., Lecomte V., Bedoussac L., Justes E.** (2012). Evaluating economic and technical performances of sunflower-soybean intercrop in French farming systems.
10. **18<sup>th</sup> International Sunflower Conference (Argentina)**  
**Justes E., Tribouillois H., Cristante P., Estragnat A., Champclou D., Vericel G., Lande N., Bedoussac L.** (2012). Is sunflower intercropped with soybean an efficient solution for increasing natural resources use and yield production?
11. **Séminaire d’animation scientifique : « Des ingénieries par et pour le vivant, écologiques et agro-écologiques » (France)**  
**Kammoun B., Bedoussac L., Journet E.-P., Justes E.** (2013). Etude de l’effet variétal sur les interactions interspécifiques pour optimiser les performances des cultures associées de blé dur-pois d’hiver et blé dur-féverole d’hiver.
12. **DINABIO (France)**  
**Bedoussac L., Journet E.-P., Hauggaard-Nielsen H., Naudin C., Corre-Hellou G., Prieur L., Jensen E. S., Justes E.** (2013) Les cultures associées de céréale-légumineuse à graines : une application de principes écologiques au service de l’agriculture biologique.
13. **11<sup>th</sup> International Association for Ecology congress (United Kingdom)**  
**Alignier A., Andrieu E., Bedoussac L., Journet E.-P., Ouin A., Sarthou J.-P., Vialatte A., Brin A.** (2013) Is there a synergy between hedges and intercrops for pest biocontrol ?
14. **1<sup>st</sup> Legume Society Conference (Serbia)**  
**Bedoussac L., Journet E.-P., Justes E.** (2013). Reducing biotic stresses in legumes through intercropping with durum wheat.
15. **1<sup>st</sup> Legume Society Conference (Serbia)**  
**Kammoun B., Bedoussac L., Journet E.-P., Justes E.** (2013). Optimizing durum wheat-grain legumes intercropping through cultivar choice.

## POSTERS

16. **13th Congress of European Society for Agronomy (Poland)**  
**Bedoussac L.**, Journet E.-P., Hauggaard-Nielsen H., Naudin C., Corre G., Prieur L., Jensen E.S., Justes E. (2014). Intercropping cereal with grain legume, an application of ecological principles to improve overall productivity and quality.
17. **14th Congress of European Society for Agronomy (Scotland)**  
Viguiet L., Journet E.-P., **Bedoussac L.**, Justes E. (2016). Intercropping of lentil and spring wheat increases productivity in organic farming.
18. **14th Congress of European Society for Agronomy (Scotland)**  
**Bedoussac L.**, Tribouillois H., Plaza-Bonilla D., Journet E.-P., Justes E. (2016). Designing and evaluating arable cropping systems with cash and cover crop legumes in sole crop and intercrop to improve nitrogen use.
19. **Séminaire Stics 2017 (France)**  
Falconnier G., Journet E.-P., **Bedoussac L.**, Vermue A., Chlebowski F., Beaudoin N., Justes E. (2017). Modelling faba bean with the STICS soil-crop model: Parameterization and independent validation