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

Laurent Bedoussac

▶ **To cite this version:**

Laurent Bedoussac. 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. Sciences agricoles. Institut National Polytechnique de Toulouse - INPT, 2009. Français. NNT : 2009INPT007A . tel-02823637v2

HAL Id: tel-02823637
https://hal.inrae.fr/tel-02823637v2

Submitted on 17 Jan 2024

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.

THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par *L'Institut National Polytechnique de Toulouse*
Discipline ou spécialité : *Agrosystèmes, écosystèmes et environnement*

Présentée et soutenue par *BEDOUSSAC Laurent*
Le *29 Septembre 2009*

Titre : 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

---

JURY

DORÉ Thierry, Professeur, UMR Agronomie INRA-AgroParisTech, Président
JENSEN Erik Steen, Professeur, Swedish University of Agricultural Sciences, Rapporteur
JEUFFROY Marie-Hélène, Directrice de recherche, UMR Agronomie INRA-AgroParisTech, Rapporteur
COHAN Jean-Pierre, Ingénieur, ARVALIS-Institut du végétal, Examinateur
NAVAS Marie-Laure, Professeure, Département ESP-Montpellier SupAgro, Examinateur
JUSTES Eric, Ingénieur de recherche, UMR AGIR INRA-ENSAT, Directeur de thèse

---

Ecole doctorale : *Sciences Ecologiques, Vétérinaires, Agronomiques, et Bioingénieries (SEVAB)*
Unité de recherche : *INRA, UMR 1248 AGIR, Equipe VASCO*
Directeur(s) de Thèse : *JUSTES Eric et WALLACH Daniel*

MA THESE, FACILE JE VOUS L'EXPLIQUE

Peut-on produire plus et mieux en cultivant du blé dur et du pois d'hiver dans le même champ ?

Mots-clés : associations d'espèces, complémentarité, rendement, protéine.

- ## Le contexte

Au cours des 50 dernières années la production agricole a été augmentée grâce à l'utilisation des engrais et des produits chimiques (désherbants, insecticides et fongicides) mais cela s'est parfois traduit par des problèmes environnementaux.

- ## Qu'elle est la question que nous nous posons ?

Peut-on produire plus de grains et de meilleure qualité en cultivant plusieurs espèces dans un même champ tout en diminuant les effets sur l'environnement ?

- ## Comment fonctionnent les mélanges d'espèces ?

Les espèces ont des croissances, des formes, des besoins en nutriments et en lumière différents. Par conséquent, nous pensons qu'en mélangeant des espèces complémentaires chacune va pouvoir se développer sans trop pénaliser l'autre et qu'au final ce mélange produira plus de grains et de meilleure qualité que lorsque les espèces sont cultivées seules.

- ## Qu'est ce que nous avons fait ?

Nous avons cultivé du blé dur seul, du pois d'hiver seul et du blé dur mélangé avec du pois d'hiver avec plus ou moins d'engrais. Nous avons ensuite comparé la quantité de graines produite et la qualité de ces grains (la teneur en protéines).

- ## Quels sont les résultats que nous avons obtenus ?

Nos travaux ont montré que lorsqu'il n'y avait pas ou peu d'engrais les associations produisaient jusqu'à 19% de graines en plus que les cultures seules et que la qualité (teneur en protéines) des grains de blé dur était augmentée de 14% en moyenne. Par contre, lorsque l'on apporte plus d'engrais le blé dur « étouffe » le pois d'hiver et finalement le mélange est moins performant que les cultures seules.

- ## Qu'est ce que nous allons faire maintenant ?

Nous allons chercher à savoir quels sont les meilleurs mélanges c'est-à-dire quelles sont : 1) les espèces et les variétés à associer, 2) les densités et les dates de semis optimales et 3) quelle est la fertilisation (engrais) à apporter. Le nombre de possibilités étant infini nous ne pouvons pas toutes les tester au champ et donc nous allons utiliser des modèles mathématiques simulant la croissance des plantes.

THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par *L'Institut National Polytechnique de Toulouse*
Discipline ou spécialité : *Agrosystèmes, écosystèmes et environnement*

Présentée et soutenue par *BEDOUSSAC Laurent*
Le *29 Septembre 2009*

Titre : 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

---

JURY

DORÉ Thierry, Professeur, UMR Agronomie INRA-AgroParisTech, Président
JENSEN Erik Steen, Professeur, Swedish University of Agricultural Sciences, Rapporteur
JEUFFROY Marie-Hélène, Directrice de recherche, UMR Agronomie INRA-AgroParisTech, Rapporteur
COHAN Jean-Pierre, Ingénieur, ARVALIS-Institut du végétal, Examinateur
NAVAS Marie-Laure, Professeure, Département ESP-Montpellier SupAgro, Examinateur
JUSTES Eric, Ingénieur de recherche, UMR AGIR INRA-ENSAT, Directeur de thèse

---

Ecole doctorale : *Sciences Ecologiques, Vétérinaires, Agronomiques, et Bioingénieries (SEVAB)*
Unité de recherche : *INRA, UMR 1248 AGIR, Equipe VASCO*
Directeur(s) de Thèse : *JUSTES Eric et WALLACH Daniel*

« 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

Avant de présenter le résultat de mes trois années de thèse je souhaite remercier toutes les personnes qui, d'une manière ou d'une autre, ont contribué à sa réalisation. Je suis conscient que la liste de remerciements qui va suivre n'est pas exhaustive et je m'excuse par avance auprès de tous ceux que j'oublierai de mentionner mais à qui je veux témoigner toute ma gratitude.

En préalable, j'ai une pensée pour tous les enseignants que j'ai eu la chance de croiser tout au long de mes études et en particulier ceux de l'Institut National Agronomique de Paris-Grignon pour m'avoir transmis une part de leur savoir et pour m'avoir aidé à trouver ma voie. Parmi eux j'ai une pensée toute particulière pour Bertrand Ney dont le premier cours d'agronomie m'a laissé un souvenir irremplaçable qui je pense a été à l'origine de mon orientation vers l'agronomie ainsi que pour Thierry Doré qui m'a donné le goût de la recherche et de l'enseignement lors de mon année de spécialisation.

En premier lieu, je veux remercier ma famille. Martine et André mes parents, qui m'ont permis de faire les études qui m'ont amené à réaliser cette thèse et, sans qui, je ne serais pas celui que je suis aujourd'hui. Je remercie également mon frère François qui m'a toujours apporté son soutien et ses encouragements sans oublier ma nourrice Huguette et son mari Laurent qui ont participé à mon éducation. J'ai aussi une pensée pour mes défunts grands parents paternels qui exerçaient le dur mais beau métier d'agriculteur ce qui a peut être participé à mon orientation vers des études d'agronomie. Je n'oublie pas non plus ma grand-mère maternelle Henriette et son défunt mari que je n'ai pas eu la chance de connaître mais qui sont aussi pour quelque chose dans ma venue au monde.

Je veux aussi dire à ma princesse, Amélie, que son soutien lors de ces deux dernières années a été essentiel dans la réussite de cette thèse. Il n'y a pas de mots assez forts pour dire combien je lui suis reconnaissant et en particulier d'avoir supporté ma mauvaise humeur et mon investissement parfois exagéré dans ce travail au détriment de notre vie commune. Je la remercie également pour le temps qu'elle a consacré à la relecture de ce manuscrit et pour toutes les suggestions qu'elle a apportées pour en améliorer l'orthographe et la linguistique.

Cette thèse n'aurait pu se faire sans Eric Justes mon directeur de thèse qui m'a fait confiance, m'a encouragé, accompagné et supervisé tout au long de ces trois années. Là encore je ne trouve pas les mots pour décrire ce qu'il m'a apporté tant d'un point de vue professionnel qu'humain. Je pense que j'ai eu la chance d'avoir un directeur de thèse qui a su être exigeant quand il le fallait mais qui a aussi su me forcer à prendre du repos lorsque cela s'avérait nécessaire. Merci encore Eric pour les invitations à venir voir les matches de rugby, ce qui a je crois, consolidé nos liens et aidé notre travail en commun.

Bien entendu je remercie Marie-Hélène Jeuffroy et Erik Steen Jensen les rapporteurs de cette thèse qui ont bien voulu relever le défi de la lire et de l'évaluer en seulement quinze jours ainsi que les membres du jury à savoir Jean-Pierre Cohan, Thierry Doré et Marie-Laure Navas.

Je remercie également Michel Duru pour m'avoir accueilli dans l'UMR AGIR et plus généralement l'INRA qui m'ont permis de faire cette thèse dans d'excellentes conditions. J'ai une pensée toute particulière pour Jean-Marie Nolot qui m'a apporté de précieux conseils lors des longues discussions que nous avons eu, parfois peut-être trop longues, mais néanmoins toujours intéressantes. Merci également à Daniel Wallach mon co-directeur de thèse qui a toujours été la quand j'en avais besoin. Je voudrai lui dire que, même si nous n'avons finalement que peu interagi sur cette thèse – en raison de la réorientation du sujet – cela n'est que partie remise.

Remerciements

Un grand merci à tous les techniciens qui ont participé à la réalisation des essais et autres mesures qui ont été réalisés au cours de ces trois ans. Parmi eux je remercie tout particulièrement Patrice Rouet, Denis Chesneau, Patrick Petibon et Pierre Perrin sans qui l'acquisition des données nécessaires à cette thèse n'aurait pas été possible, Je n'oublie pas non plus Colette Quinquiry, Denis Raffaillac, Nathalie Seguin et Michel Labarrère pour leur participation ponctuelle mais néanmoins nécessaire ainsi que tous les techniciens du domaine qui ont permis l'implantation des essais et la réalisation de toutes les opérations techniques au champ. Je remercie également les informaticiens Denis Baudet et Areski Zerourou qui ont fait tout leur possible pour résoudre les problèmes informatiques auxquels j'ai été confronté. Je suis également très reconnaissant à Olivier Delfosse d'avoir réalisé les nombreuses analyses d'excès isotopique ^{15}N avec rapidité et soin.

Je remercie enfin Françoise Roux pour le suivi administratif de ma thèse et pour ses conseils de documentaliste ainsi que Geneviève Santoro, Mary Perreu et Christel Moder pour leur gentillesse et leur disponibilité. Un grand merci également à tous les stagiaires qui ont participé aux différentes expérimentations à savoir, par ordre d'apparition sur les essais : Guillaume, Virginie, Hélène, Sébastien, Maud, Xavier, Alexandre et Audrey. Je sais qu'ils se souviendront encore longtemps des longues journées passées ensemble et ce même si je me doute bien que cela n'a pas toujours été une partie de plaisir pour eux. Merci également aux autres doctorants : Celia, Clémentine, Guillaume, Jérôme, Lucie, Pierre et Solenne avec qui nous partagé plus que des bureaux communs tout au long de ces trois années.

Je suis également reconnaissant envers l'école doctorale SEVAB pour m'avoir fait confiance en m'attribuant cette bourse d'allocation ministérielle pour réaliser cette thèse et en particulier à Sovan Lek, Claude Maranges et Dominique Galy. Enfin je remercie Annie Ouin qui fût ma tutrice pendant mon monitorat et qui m'a permis de découvrir les joies de l'enseignement ainsi que David Sheeren avec qui j'ai également eu le plaisir d'exercer « le plus beau métier du monde ».

Merci à tous les membres de mon comité de pilotage Jacques-Eric Bergez, Guénaëlle Corre-Hellou, Stéphane De Tourdonnet, Dominique Desclaux, Christian Dupraz, Philippe Gate, Jean-Louis Hemptinne et Marie Launay pour leurs précieux conseils et le temps qu'ils m'ont consacré.

Je n'oublie pas non plus Alan Scaife sans qui la qualité de l'anglais de mes articles ne serait pas ce qu'elle est et qui au-delà de ces aspects linguistiques m'a également fait part de remarques des plus pertinentes.

Je voudrais également dire à Loïc Prieur (CREAB-32) et Max Haefliger (BIOCIVAM-11) que ce fût pour moi un réel plaisir de travailler avec eux et que j'espère que ce n'est là que le début d'une longue collaboration. Merci également à Nicolas Lecat (Agribio Union) et à la coopérative Arterris pour les informations techniques qu'ils ont bien voulu me transmettre.

Enfin, j'ai une pensée pour tous mes colocataires : Camille, Aitzi, Nerea et Laurence qui eux aussi ont eu à subir les conséquences de cette thèse de façon plus ou moins prolongée. Je sais que dorénavant je n'aurai plus d'excuses pour me détourner de certaines tâches ménagères. Bien entendu je pense aussi à tous mes copains qui m'ont soutenu au cours de ces trois années et m'ont permis de me sortir la tête de mon travail et je ne serai pas rancunier s'ils s'arrêtent de lire ce manuscrit à la fin de cette page. J'ai une pensée particulière pour François Charrier pour les parties de pala et les longues discussions que nous avons eues pendant les dernières semaines de ma thèse.

Table des matières

CHAPITRE I SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE ET DÉMARCHE

I. Introduction générale 14

II. Avantages supposés des associations : quels intérêts pour le blé dur et pour la production de légumineuses dans le Sud de la France ? 15

II.1 Avantages supposés des associations 15

II.2 Les associations blé dur – légumineuse d'hiver pour améliorer la qualité du blé dur et augmenter la production de légumineuse ? 16

II.2.1. Améliorer la qualité du blé dur en bas-intrants 16

II.2.2. Accroître la production de légumineuses 16

II.2.3. Une absence de référence dans le cas des cultures d'hiver 16

III. Méthode d'analyse, principes et fonctionnement des associations 17

III.1 Méthode d'analyse des associations 17

III.2 Principes généraux sur le fonctionnement des associations 18

III.3 Complémentarités et compétitions pour l'utilisation des ressources 19

III.3.1. Acquisition de l'azote : de la compétition à la complémentarité 19

III.3.2. Les associations permettraient une meilleure acquisition de la lumière 20

IV. Itinéraires techniques et effets des choix techniques sur le fonctionnement et la performance des associations 21

IV.1 La notion d'itinéraire technique 21

IV.2 Effet des techniques culturales sur le fonctionnement des associations 22

IV.2.1. Quelles espèces et variétés à associer ? 22

IV.2.2. Quelles densités de semis ? 23

IV.2.3. Influence de la structure du couvert 25

IV.2.4. Effet de la fertilisation azotée sur les associations 25

V. Objectifs, hypothèses et organisation du manuscrit 26

V.1 Objectifs de la thèse 26

V.2 Hypothèses générales et hypothèses en lien avec les choix techniques 27

V.3 Organisation du manuscrit 28

CHAPITRE II MATERIELS ET METHODES

I. Stratégie adoptée dans le choix des expérimentations 30

I.1 2005-2006 : Exploration des possibles 30

I.2 2006-2007 : Comprendre les processus 30

I.3 2007-2008 : Evaluation d'itinéraires techniques conçus à dire « d'experts » 31

II. Description des traitements expérimentaux retenus 31

II.1 Généralités 31

II.2 Essai 2005-2006 : Exploration des possibles 34

II.3 Essai 2006-2007 : Comprendre les processus 35

II.4 Essai 2007-2008 : Evaluation d'itinéraires techniques conçus à dire « d'experts » 36

III. Mesures et traitement des données 36

III.1 Prélèvements 36

III.2 Biomasse et acquisition de l'azote **38**

III.3 Structure du couvert et acquisition de la lumière **38**

III.4 Evaluation de la pression des facteurs biotiques ... 39
IV. Conditions pédo-climatiques et déroulement des cycles culturaux ... 39
IV.1 Conditions climatiques ... 39
IV.2 Conditions pédologiques ... 41
IV.3 Observations des stades de développement ... 42
V. Quels sont les indicateurs les plus pertinents pour étudier les interactions entre espèces dans l'association blé dur – pois d'hiver ? ... 44
V.1 Introduction ... 45
V.2 Materials and methods ... 45
V.2.1. Site and Soil ... 45
V.2.2. Experimental design ... 45
V.2.3. Measurements and analysis ... 46
V.2.4. Definition and calculation of indices ... 47
V.2.4.1. Yield Land Equivalent Ratio ... 47
V.2.4.2. Yield Aggressivity ... 49
V.2.4.3. Yield Plant Aggressivity ... 49
V.2.4.4. Change in contribution for Yield ... 49
V.2.4.5. Interspecific interaction yield index ... 50
V.2.4.6. Intraspecific interaction yield index ... 50
V.2.4.7. Cumulative Relative Efficiency Index ... 51
V.2.4.8. Comparative absolute growth rate ... 51
V.2.5. Statistics ... 52
V.3 Results ... 52
V.3.1. Interspecies growth dynamics ... 52
V.3.2. Yield and N accumulated ... 53
V.3.2.1. Yield ... 53
V.3.2.2. N accumulated in shoots ... 53
V.3.3. Interaction indices ... 54
V.3.3.1. Yield aggressivity and N aggressivity ... 54
V.3.3.2. Plant aggressivity for yield and N accumulated ... 56
V.3.3.3. Change in Contribution for yield and N accumulated ... 56
V.3.4. Intercropping yield advantages ... 56
V.3.4.1. Land equivalent ratio for yield and N accumulated ... 56
V.3.4.2. Intraspecific and interspecific interaction effects on yield and on N accumulated ... 58
V.4 Discussion ... 60
V.4.1. Growth dynamics ... 60
V.4.2. Interaction index for yield and N accumulated ... 60
V.4.3. Intercropping advantages for yield and N accumulated ... 62
V.5 Conclusion ... 63

Table des matières

CHAPITRE III EVALUATION DE LA PERFORMANCE DES ASSOCIATIONS BLÉ DUR – LÉGUMINEUSE À GRAINES POUR LA PRODUCTION DE GRAINES ET LA TENEUR EN PROTÉINES DU BLÉ DUR

I. L'efficacité de l'association blé dur – pois d'hiver pour améliorer le rendement et la teneur en protéines du blé dur dépend de la disponibilité précoce en azote. 66

I.1 Introduction 67

I.2 Materials and methods 67

I.2.1. Site and Soil 67

I.2.2. Experimental design 67

I.2.3. Measurements and analysis 69

I.2.4. Calculations 69

I.2.5. Statistics 70

I.3 Results 70

I.3.1. N availability according to treatments 70

I.3.2. N complementarities in intercrop 71

I.3.2.1. N acquisition and N accumulation in shoots 71

I.3.2.2. N_2 fixation of pea 72

I.3.2.3. Land equivalent ratio for N accumulated in shoots 73

I.3.3. Intercropping dry weights and yields and wheat grain quality 74

I.3.3.1. Dry weight and yield 74

I.3.3.2. Dry weight and yield land equivalent ratios 75

I.3.3.3. Intercropping advantage for wheat grain protein concentration 77

I.3.4. Functional relationships 77

I.4 Discussion 78

I.4.1. N complementarity in intercrop 78

I.4.2. Intercropping production 79

I.4.3. Functional relationships 80

I.5 Concluding remarks 81

II. L'efficacité de l'association blé dur – féverole d'hiver pour améliorer le rendement et la teneur en protéines du blé dur dépend de la densité des espèces. 82

II.1 Introduction 83

II.2 Matériels et méthodes 83

II.2.1. Protocoles expérimentaux 83

II.2.2. Mesures et analyses 86

II.2.3. Calculs 86

II.2.3.1. Calcul de la fixation symbiotique de la féverole d'hiver 86

II.2.3.2. Calcul des Land Equivalent Ratio 86

II.3 Résultats 87

II.3.1. Complémentarité pour l'azote dans les associations blé dur – féverole d'hiver 87

II.3.1.1. Accumulation de l'azote dans les parties aériennes 87

II.3.1.2. Fixation symbiotique de la féverole d'hiver 88

II.3.1.3. Land equivalent ratio pour l'azote accumulé 88
II.3.2. Matière sèche, rendement et land equivalent ratio 89
II.3.2.1. Matière sèche et rendement 89
II.3.2.2. Land equivalent ratio pour la matière sèche et le rendement 90
II.3.3. L'association blé dur – féverole d'hiver améliore la teneur en protéines du blé dur 91
II.3.4. Dynamique de l'acquisition de l'azote, de la matière sèche et croissance en hauteur 92
II.3.4.1. Dynamique de l'acquisition de l'azote 93
II.3.4.2. Dynamique de la production de matière sèche 93
II.3.4.3. Dynamique de la croissance en hauteur 94
II.3.5. Effet de la biomasse et de la densité des deux espèces sur la production 94
II.3.5.1. Relation entre les niveaux de production de chaque espèce 95
II.3.5.2. Relation entre les biomasses et les densités des deux espèces 96
II.4 Discussion 98
II.4.1. Complémentarité pour l'azote dans les associations 98
II.4.2. Performance des associations pour la matière sèche et le rendement 98
II.4.3. L'association blé dur – féverole d'hiver et l'amélioration de la qualité du blé dur 99
II.4.4. La croissance dynamique du blé dur et de la féverole d'hiver 100
II.4.5. Une performance qui est fonction des densités des deux espèces 101
II.5 Conclusion 103

CHAPITRE IV ETUDE DES DYNAMIQUES, COMPÉTITIONS ET COMPLÉMENTARITÉS ENTRE ESPÈCES DANS LES ASSOCIATIONS BLÉ DUR – POIS D'HIVER

I. Dynamiques, compétitions et complémentarités entre espèces pour l'utilisation de la lumière et de l'azote dans les associations blé dur – pois d'hiver sont déterminées par la disponibilité en azote. 106

I.1 Introduction 107
I.2 Materials and methods 107
I.2.1. Site and Soil 107
I.2.2. Experimental design 107
I.2.3. Measurements and analysis 107
I.2.4. Calculations 108
I.2.5. Statistics 110
I.3 Results 110
I.3.1. Growth dynamics 110
I.3.1.1. Emergence and plant density 110
I.3.1.2. Leaf area index 110
I.3.1.3. Dry weight production 113
I.3.1.4. Growth in height 113
I.3.2. Resource use dynamics 116
I.3.2.1. Light absorption 116
I.3.2.2. Nitrogen acquisition 116
I.3.3. Intercropping advantages 116
I.3.3.1. Dry weight land equivalent ratio 116

I.3.3.2. N land equivalent ratio 119
I.3.3.3. Wheat nitrogen nutrition index 119
I.4 Discussion 119
I.4.1. Growth dynamics 119
I.4.2. Resource use dynamics 121
I.4.2.1. Light absorption 121
I.4.2.2. Nitrogen acquisition 121
I.4.3. Dry weight and nitrogen acquisition: advantages of intercropping 122
I.4.4. Wheat nitrogen nutrition index 122
I.5 Conclusion 123
II. Analyse dynamique de l'élaboration du rendement de cultivars de blé dur en association avec du pois d'hiver. 124
II.1 Introduction 125
II.2 Materials and methods 125
II.2.1. Site and Soil 125
II.2.2. Experimental design 125
II.2.3. Measurements and analysis 126
II.2.4. Calculations of indices used for analysing results 126
II.2.4.1. Comparative absolute growth rate 126
II.2.4.2. Interspecific interaction indices 126
II.2.4.3. Intraspecific interaction indices 127
II.2.5. Statistics 128
II.3 Results 129
II.3.1. Growth dynamics 129
II.3.1.1. Interspecies growth dynamics 129
II.3.1.2. Intraspecific and interspecific interaction in dynamics 129
II.3.2. Wheat yield formation 131
II.3.2.1. Yield 131
II.3.2.2. Intraspecific and interspecific competition effects on wheat yield components 132
II.3.2.3. Interspecific competition effects on wheat grain protein content 133
II.3.2.4. Wheat cultivar characteristics 135
II.4 Discussion 137
II.4.1. Growth dynamics 137
II.4.2. Consequences on wheat yield components 137
II.4.3. Effects on grain protein content 138
II.5 Concluding remarks 139

CHAPITRE V CONCEPTION PAR EXPERTISE ET ÉVALUATION DE PROTOTYPES D'ITINÉRAIRES TECHNIQUES D'ASSOCIATIONS BLÉ DUR – LÉGUMINEUSE À GRAINES

I. Critères et objectifs de production : du concept aux associations 142

I.1 Critères et objectifs de production : cadre conceptuel 142

I.2 Quels objectifs de production pour les associations ? 142

II. Présentation, objectifs et hypothèses des prototypes d'itinéraires techniques conçus à dire « d'experts » 144

II.1 Association en ligne blé dur – pois d'hiver 144

II.2 Association en « vrac » blé dur – pois d'hiver 145

II.3 Association en ligne additive blé dur – pois d'hiver 145

II.4 Association en ligne blé dur – féverole d'hiver sans intrant 145

II.5 Association en ligne blé dur – féverole d'hiver très bas intrants 146

II.6 Présentation des itinéraires techniques monospécifiques servant de référence pour l'évaluation des associations 147

II.6.1. Cultures « pures » de blé dur 147

II.6.2. Cultures « pures » de pois d'hiver et de féverole d'hiver 147

II.7 Récapitulatif des traitements expérimentaux 148

III. Matériels et méthodes 148

III.1 Protocoles expérimentaux 148

III.2 Mesures, analyses et calculs 150

III.2.1. Matière sèche, rendement et azote accumulé 150

III.2.2. Calcul des Land Equivalent Ratio 150

III.2.3. Evaluation de la pression des facteurs biotiques 151

III.2.3.1. Maladies 151

III.2.3.2. Ravageurs 151

III.2.3.3. Adventices 152

III.2.4. Evaluation économique des prototypes d'itinéraires techniques de cultures en association 152

III.2.4.1. Méthode de calcul de la marge directe et hypothèses 152

III.2.4.2. Droits à paiement unique et aides 152

III.2.4.3. Charges matérielles 153

III.2.4.4. Charges opérationnelles 153

III.2.4.5. Prix du produit brut 154

IV. Evaluation quantitative et qualitative des prototypes d'itinéraires techniques de culture en association 154

IV.1 Accumulation de l'azote dans les parties aériennes 154

IV.2 Matière sèche et rendement 155

IV.3 Land Equivalent Ratio pour l'azote accumulé et le rendement 156

IV.4 Effet des associations sur la teneur en protéines des grains 157

IV.5 Effet des associations sur le reliquat azoté à la récolte 159

V. Evaluation des associations pour la lutte contre les bio-agresseurs 160

V.1 Cas des maladies foliaires 160

V.1.1. Cas des maladies foliaires du blé dur 160

V.1.2. Cas des maladies foliaires du pois d'hiver et de la féverole d'hiver 161
V.2 Cas des pucerons et des sitones du pois d'hiver et de la féverole d'hiver 162
V.2.1. Cas des sitones du pois d'hiver et de la féverole d'hiver 162
V.2.2. Cas des pucerons du pois d'hiver et de la féverole d'hiver 164
V.3 Cas des adventices 165
VI. Evaluation économique des prototypes d'itinéraires techniques de cultures en association 166
VI.1 Marges directes obtenues dans l'expérimentation 2007-2008 166
VI.2 Marges directes et assolement 168
VII. Discussion sur la performance des itinéraires techniques association conçus à dire « d'experts » et perspectives 169
VII.1 Les associations et l'amélioration qualitative du blé dur 169
VII.2 Les associations et l'amélioration quantitative de la production 171
VII.3 Effet des associations sur le reliquat azoté à la récolte 172
VII.4 Les associations et la lutte contre les bio-agresseurs 173
VII.4.1. Associations et maladies foliaires du blé dur 173
VII.4.2. Associations et maladies foliaires du pois d'hiver et de la féverole d'hiver 175
VII.4.3. Associations et sitones du pois d'hiver et de la féverole d'hiver 176
VII.4.4. Associations et pucerons verts du pois d'hiver 179
VII.4.5. Associations et adventices 181
VII.5 Performance économique des associations 182
VIII. Conclusion : les itinéraires techniques d'associations sont-ils performants ? 185

SYNTHESE DES PRINCIPAUX RESULTATS ; CONCLUSION GENERALE ; PERSPECTIVES ET THEMATIQUES DE RECHERCHE A DEVELOPPER POUR LA CONCEPTION D'ITINÉRAIRES TECHNIQUES ADAPTÉS AUX ASSOCIATIONS

I. Synthèse des principaux résultats 190
I.1 Les associations blé dur – légumineuse à graines améliorent le rendement relatif et la qualité du blé dur 190
I.1.1. L'accroissement du rendement relatif des associations dépend essentiellement de la disponibilité en azote et des densités des espèces 190
I.1.2. Les associations améliorent la teneur en protéines du blé dur par une disponibilité en azote par épi supérieure 191
I.2 Les associations blé dur – légumineuse à graines améliorent l'utilisation de l'azote et de la lumière . 192
I.2.1. A niveau de production identique les besoins en fertilisation azotée des associations sont réduits 192
I.2.2. Les associations réduisent le risque de lixiviation de nitrate par rapport aux légumineuses « pures » 193
I.2.3. Les associations utilisent plus efficacement l'énergie lumineuse par la complémentarité spatiale et temporelle des espèces associées 193
I.3 Les associations permettent de diminuer le recours aux pesticides 194
I.3.1. Les associations limitent le développement des maladies fongiques par un effet barrière 194
I.3.2. Les associations ont un effet limité sur les sitones 195
I.3.3. Les associations réduisent les populations de pucerons du pois d'hiver 196

I.3.4. Les associations réduisent l'enherbement comparativement au pois d'hiver « pur » mais pas vis-à-vis de la féverole d'hiver « pure » ... 196

II. Conclusion générale : Que retenir des associations de blé dur et de légumineuse à graines ? ... 197

III. Perspectives et thématiques de recherche à développer pour la conception d'itinéraires techniques adaptés aux associations ... 198

III.1 Quelles perspectives de recherche à approfondir ? ... 198

III.1.1. Le rôle des variétés ... 198

III.1.2. Le rôle de la structure du couvert et des densités ... 198

III.1.3. Les associations et les bio-agresseurs ... 199

III.1.4. Les associations blé dur – féverole d'hiver et l'azote ... 200

III.2 Quelles perspectives de recherche à développer ? ... 200

III.2.1. Quelles autres espèces à associer ? ... 200

III.2.2. Les associations et la faisabilité technique ... 200

III.2.3. Les associations et les autres éléments majeurs P et K ... 201

III.2.4. Les associations et la variabilité interannuelle ... 201

III.2.5. La modélisation pour aider à la conception d'itinéraires techniques ... 202

III.2.6. Quelle place pour les associations dans les systèmes de culture ? ... 202

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES ... 203

LISTE DES FIGURES ... 213

LISTE DES TABLEAUX ... 219

ANNEXES ... 223

Annexe I. Plan expérimental 2005-2006 ... 224

Annexe II. Plan expérimental 2006-2007 ... 225

Annexe III. Plan expérimental 2007-2008 ... 226

Annexe IV. Calculs ... 227

Annexe V. Abaque de détermination de la surface des feuilles et gousses malades du pois d'hiver et de la féverole d'hiver ... 231

Annexe VI. Abaque de détermination de la surface des feuilles malades du blé dur ... 232

Annexe VII. Grilles de calcul des bonus et malus sur la qualité du blé dur en systèmes conventionnels et biologiques ... 233

CHAPITRE I

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE ET DEMARCHE

I. Introduction générale

Au cours des cinquante dernières années, l'intensification de l'agriculture permise par la sélection variétale, la mécanisation et l'utilisation des intrants chimiques (Evans 1998) a contribué dans certaines zones à l'apparition de problèmes environnementaux : érosion des sols, pollutions environnementales par les engrais et les pesticides mais aussi sélection de maladies, ravageurs et mauvaises herbes résistantes aux traitements chimiques (Cox et Atkins 1979 ; Jackson et Piper 1989 ; Vandermeer et al. 1998 ; Griffon 2006). L'émergence des préoccupations liées à l'environnement et aux économies d'intrants pose la nécessaire question de l'amélioration de l'efficacité des systèmes de production agricoles. Il devient donc urgent de développer de nouvelles solutions agronomiques en considérant comme le propose Griffon (2007) quatre variables que sont : i) la quantité, ii) la qualité, iii) la production de services écologiques et iv) l'adaptation des systèmes de production au contexte de changement climatique. La plupart des agronomes, écologues et acteurs du développement s'accordent sur le fait que la poursuite d'une agriculture intensive fondée sur des espèces et variétés à très haut potentiel utilisant massivement les pesticides et ayant recours à une mécanisation de plus en plus lourde n'est pas une solution envisageable durablement. Par ailleurs, et même si la question fait encore débat, l'agriculture biologique telle que nous la connaissons ne pourrait vraisemblablement pas faire face aux besoins quantitatifs alimentaires de la planète en l'absence d'une remise en question de nos modes de consommations occidentaux et en particulier de la réduction de la part de protéines animales dans notre alimentation.

Toutefois, il existe un certain nombre de techniques qui ouvrent des perspectives intéressantes et qui seraient plus durables consistant à utiliser intensivement les mécanismes écologiques naturels des écosystèmes. Techniques auxquelles pourraient s'ajouter l'usage des méthodes conventionnelles, sous réserve qu'elles n'interfèrent pas négativement avec les premières (Griffon 2006). Parmi ces techniques nous pouvons citer le semis direct sous couverture végétale, l'agroforesterie qui associe une production agricole annuelle (culture ou pâture) avec une production forestière, la diversification et l'allongement des rotations et toutes les méthodes de lutte biologique comme le choix de variétés résistantes, l'aménagement de zones « refuge » permettant l'installation durable de prédateurs naturels ou encore la mise en place de « trapps and killing zones » qui consiste à attirer les ravageurs dans un endroit par le biais d'hormones sexuelles pour ensuite les éliminer. Ces alternatives technologiques, qui pourraient se substituer autant que possible aux techniques conventionnelles de forçage chimique généralement énergivores, sont regroupées sous les termes d'agroécologie (CIRAD, Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement), d'écoagriculture (UICN, Union Internationale pour la Conservation de la Nature), de révolution doublement verte (CGIAR, Consultative Group on International Agricultural Research) ou encore d'agriculture écologiquement intensive ou à haute valeur environnementale (Griffon 2006 ; Grenelle de l'environnement de 2007).

Parmi ces techniques, la diversification des agrosystèmes par l'augmentation du nombre d'espèces cultivées et par l'utilisation d'une part plus importante de légumineuses a été proposée comme l'un des moyens de répondre aux enjeux de l'agriculture de demain (Vandermeer 1995 ; Vandermeer et al. 1998 ; Altieri 1999 ; Griffon 2006 ; Malézieux et al. 2008). Cette diversification peut être obtenue par l'augmentation du nombre d'espèces dans les rotations mais également par l'association d'espèces c'est à dire par **la culture simultanée de deux espèces ou plus sur une même surface pendant une période significative de leur croissance mais sans nécessairement être semées et récoltées en même temps** (Willey 1979a ; Vandermeer 1989). Ces associations, en particulier les mélanges de graminée et de légumineuse, sont courantes à l'état naturel et dans les systèmes prairiaux. Ils ont

pourtant quasiment disparu des agrosystèmes cultivés européens suite à l'intensification de l'agriculture au cours des cinquante dernières années, à l'exception toutefois de quelques systèmes destinés à l'alimentation animale (Anil et al. 1998 ; Malézieux et al. 2008). On observe tout de même aujourd'hui un regain d'intérêt pour les associations de céréale et de légumineuse en Europe (Anil et al. 1998 ; Malézieux et al. 2008) grâce à la recherche d'une diversification des systèmes de culture (Altieri 1999 ; Vandermeer et al. 1998 ; Malézieux et al. 2008) et d'une agriculture plus écologique (Vandermeer 1995 ; Malézieux et al. 2008).

II. Avantages supposés des associations : quels intérêts pour le blé dur et pour la production de légumineuses dans le Sud de la France ?

II.1 Avantages supposés des associations

Les deux raisons les plus souvent avancées pour l'adoption des associations d'espèces résident dans le gain de rendement global par rapport à des cultures « pures » (monospécifiques) et dans l'amélioration significative et quasi systématique de la teneur en protéines de la céréale – ceci quelle que soit sa proportion dans le mélange récolté (Jensen 1996). Ces résultats, obtenus aussi bien en agriculture conventionnelle (avec apport d'engrais azotés et contrôle chimique des maladies, ravageurs et adventices) qu'en agriculture biologique (sans intrant chimique), s'expliqueraient par une meilleure valorisation des ressources du milieu comparativement aux cultures monospécifiques correspondantes. Ce serait tout particulièrement vrai dans le cas des associations céréale – légumineuse et dans les systèmes à bas niveaux d'intrants azotés (Willey 1979a, b ; Ofori et Stern 1987 ; Vandermeer 1989 ; Willey 1990 ; Fukai et Trenbath 1993 ; Jensen 1996 ; Hauggaard-Nielsen et al. 2003 ; Bedoussac et Justes 2009, **Chapitre III, Partie I**).

Les associations pourraient également être un moyen de réduire dans certaines situations la pression des adventices, maladies et ravageurs (Trenbath 1993 ; Altieri 1999) souvent considérés comme des facteurs déterminants de la production agricole faisant ainsi des associations une alternative à la lutte chimique (Liebman 1988 ; White et Scott 1991 ; Liebman et Dyck 1993 ; Midmore 1993 ; Bulson et al. 1997 ; Liebman et Davis 2000 ; Hauggaard-Nielsen et al. 2001b). D'autre part, les mélanges d'espèces présenteraient d'autres avantages comme : i) la réduction de l'érosion des sols par une meilleure couverture et enracinement (Anil et al. 1998), ii) une amélioration de la résistance à la verse (Anil et al. 1998), iii) une réduction des risques de lixiviation de nitrates (Hauggaard-Nielsen et al. 2003 ; Corre-Hellou 2005) ou encore iv) une meilleure stabilité interannuelle des rendements (Lithourgidis et al. 2006). Les associations céréale – légumineuse pourraient par conséquent présenter un intérêt aussi bien en agriculture biologique – pour améliorer la qualité des blés durs – qu'en agriculture conventionnelle pour réduire les intrants chimiques et améliorer les performances économiques et environnementales des systèmes de production.

II.2 Les associations blé dur – légumineuse d'hiver pour améliorer la qualité du blé dur et augmenter la production de légumineuse ?

II.2.1. Améliorer la qualité du blé dur en bas-intrants

Les associations pourraient s'avérer particulièrement intéressantes dans le cas de la production de blé dur qui représentait en 2007 dans le Sud-Ouest de la France 19% de la sole en céréales (AGRESTE 2008). Cette culture est généralement fertilisée avec des niveaux d'azote importants afin de répondre aux besoins azotés (jusqu'à 300 kg N ha^{-1} pour un objectif de rendement de 8 t ha^{-1}) et ceci pour atteindre des rendements et teneur en protéines optimaux (Garrido-Lestache et al. 2004). Dans certaines conditions cela peut conduire à des pertes de nitrate par lixiviation au cours de la période hivernale suivant la culture si la fertilisation est excessive (Abad et al. 2004). A contrario, dans les systèmes à bas niveaux d'intrants et notamment les systèmes biologiques le problème est autre. En effet, dans ces systèmes l'azote est souvent une ressource limitante et il est donc difficile d'atteindre une teneur en protéines suffisante pour éviter le mitadinage (Garrido-Lestache et al. 2004). Or, le mitadinage rend le grain inapte à la production de semoule et de pâtes de haute qualité technologique (Samaan et al. 2006), entraînant le déclassement du grain vers l'alimentation animale, ce qui engendre pour l'agriculteur une perte économique importante. Pour ces raisons la production de blé dur est extrêmement faible en France en situation d'agriculture biologique malgré une demande forte pour produire des pâtes ou de la semoule estampillées « AB ».

II.2.2. Accroître la production de légumineuses

Les mélanges d'espèces pourraient aussi être un moyen d'augmenter la production de légumineuse en Europe dont les besoins en protéines végétales sont satisfaits à plus de 70% par l'importation (chiffres 2005-2006, PROLEA 2007) – essentiellement sous forme de soja provenant des Etats-Unis et d'Amérique Latine. Les associations pourraient être particulièrement intéressantes pour la production de féverole d'hiver ou de pois d'hiver, le pois étant de loin la principale légumineuse cultivée dans le Sud-Ouest de la France avec 76% de la sole de légumineuse en 2007 (AGRESTE 2008). Ces systèmes permettraient de réduire les risques de lixiviation que l'on peut parfois observer après une légumineuse lorsque les conditions climatiques sont favorables au transfert de nitrate et qu'aucune implantation de culture intermédiaire piège à nitrate n'est réalisée. Par ailleurs, les associations pourraient être un moyen de réduire les risques de verse du pois d'hiver que l'on observe fréquemment, notamment lors de printemps pluvieux favorisant le développement de l'anthracnose. Enfin, les associations représenteraient un intérêt certain pour la diminution de la pression de ravageurs tels que les pucerons, les sitones ou encore les bruches auxquels sont sensibles les légumineuses mais aussi pour diminuer la pression de maladies et l'enherbement des cultures notamment dans le cas du pois d'hiver.

II.2.3. Une absence de référence dans le cas des cultures d'hiver

De nombreuses études ont été menées en Europe sur des associations de cultures de printemps comme les mélanges orge – pois montrant, entre autres et comme nous l'avons signalé précédemment, une amélioration des rendements relatifs et de la teneur en protéines de l'orge comparativement aux cultures « pures » (e.g. Hauggaard-Nielsen et al. 2003). Cependant, peu d'études ont été menées dans le cas d'associations de cultures d'hiver qui sont pourtant mieux adaptées aux conditions climatiques du Sud de l'Europe afin de réduire les risques de stress hydrique qui peuvent survenir dans le cas de cultures de printemps lorsqu'en fin de cycle les températures sont trop élevées et les précipitations insuffisantes. Pour toutes

ces raisons nous avons choisi comme objet d'étude les associations de blé dur – légumineuse à graines dans le cas de cultures d'hiver en se focalisant sur les deux principales espèces de légumineuses cultivées dans le Sud-Ouest de la France : le pois protéagineux d'hiver et la féverole d'hiver et ceci dans le but d'en évaluer la performance en cherchant autant que possible à comprendre les mécanismes et notamment le fonctionnement dynamique.

III. Méthode d'analyse, principes et fonctionnement des associations

III.1 Méthode d'analyse des associations

Pour évaluer la performance et le fonctionnement des associations, il est nécessaire de les comparer à des références qui sont le plus souvent les couverts monospécifiques. Dans le cas d'associations en rang (où chaque rang est composé d'une seule espèce), Cruz et Soussana (1997) ont proposé un schéma conceptuel permettant de décrire la nature des compétitions par la comparaison de couverts plurispécifiques et monospécifiques (**Figure 1**).

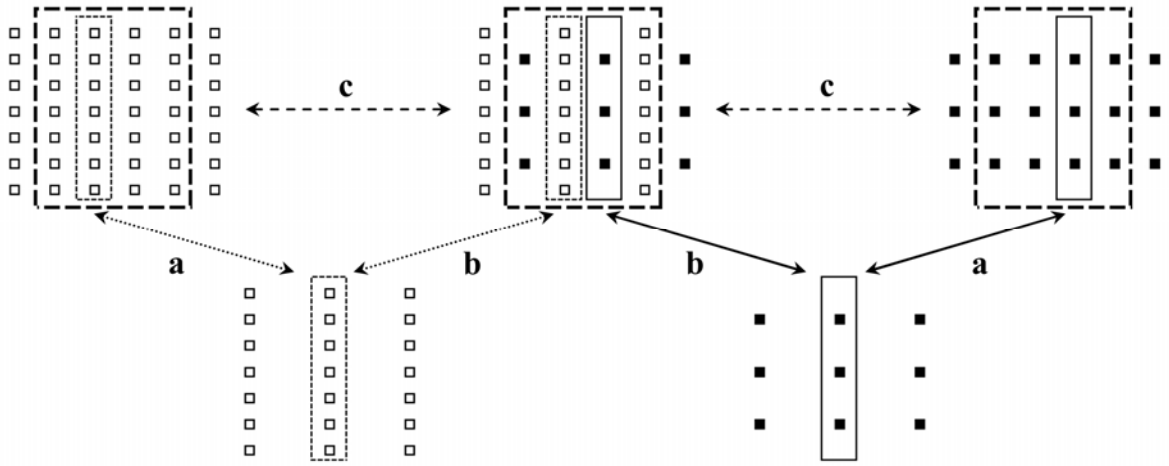


Figure 1 *Schéma conceptuel permettant l'étude : a) des compétitions intraspécifiques (rang), b) des compétitions interspécifiques (rang) et c) de l'équilibre entre compétitions intra- et interspécifiques (comparaison sur le rang ou la surface) (d'après Cruz et Soussana 1997).*

Dans une telle situation, la comparaison pour une espèce A des cultures « pures » en pleine densité et en demie densité (a) permet l'étude des compétitions intraspécifiques (l'effet de la présence de l'espèce A sur l'espèce A). Les expérimentations additives (b) où la densité de l'espèce A est la même dans l'association et dans la culture « pure » mais où la densité totale de l'association est supérieure à celle de l'espèce A en culture « pure » sont particulièrement adaptées pour étudier les compétitions interspécifiques (l'effet de la présence de l'espèce B sur l'espèce A et réciproquement). Dans les systèmes substitutifs (c), la comparaison des cultures « pures » avec l'association met en évidence un effet des compétitions à la fois inter- et intraspécifiques. Dans de telles situations, une partie des compétitions intraspécifiques est effectivement remplacée par des compétitions interspécifiques, ce qui ne permet pas de les analyser séparément. Il est à noter que dans une telle situation la densité de l'association peut être supérieure, égale ou inférieure à celle des cultures « pures » en fonction des différences de densité entre les cultures « pures » des deux espèces. Il donc préférable de considérer les densités relatives plutôt que les densités réelles (cf. **Chapitre I, Partie IV.2.2**).

III.2 Principes généraux sur le fonctionnement des associations

Dans les mélanges plurispécifiques, les interactions entre espèces peuvent être représentées comme l'effet d'une espèce sur le milieu et la réponse d'une seconde espèce à ce changement (Vandermeer 1989 ; Goldberg 1990). Vandermeer (1989) distingue ainsi deux types de réponses : la compétition qui intervient quand une espèce modifie l'environnement de façon négative pour la seconde (ombrage, extraction d'une ressource qui devient limitante…) et la facilitation lorsque ce changement est positif (allélopathie, effet barrière contre la diffusion de maladies…). A cela pourrait s'ajouter un troisième type de réponse, à savoir un effet neutre lorsque par exemple une espèce a accès à une ressource non disponible pour la seconde (utilisation de l'azote de l'air par la légumineuse, enracinement plus profond d'une espèce…). Il n'en reste pas moins que ces différentes interactions sont complexes car elles dépendent entre autres de la disponibilité en nutriments, du contexte pédo-climatique, des espèces et des cultivars associés mais aussi et surtout parce qu'elles se produisent en dynamique (Connolly et al. 1990).

Bien que traduisant un effet négatif d'une espèce sur l'autre, **les phénomènes de compétition peuvent induire un gain de rendement** lorsque les espèces associées se complètent et utilisent plus efficacement les ressources que les cultures « pures » (Willey 1979a, b). Cela se produit lorsque les composantes ne sont pas en compétition (dans le temps, l'espace ou la forme chimique) pour les mêmes ressources traduisant des compétitions interspécifiques inférieures aux compétitions intraspécifiques. Par exemple, dans le cas des associations céréale – légumineuse à graines les deux espèces sont en compétition pour l'azote du sol mais cette compétition peut s'avérer négligeable en raison de la capacité de la légumineuse à utiliser l'azote de l'air (ressource pour laquelle elle n'est pas en compétition avec la céréale) à ceci près que la fixation symbiotique a un certain coût énergétique pour la légumineuse. Dès lors, l'avantage de l'association est souvent considéré comme positivement corrélé avec le niveau de complémentarité entre les deux espèces associées pour l'utilisation des sources d'azote (Ofori et Stern 1987 ; Snaydon et Satorre 1989 ; Jensen 1996 ; Hauggaard-Nielsen et al. 2001a, b). Ceci est particulièrement intéressant à la fois pour les systèmes à bas niveaux d'intrants azotés où l'azote est souvent une ressource limitante et pour les cultures ayant des besoins importants en azote comme le blé dur par exemple (jusqu'à 300 kg N ha^{-1} pour un objectif de rendement de 8 t ha^{-1}).

Au-delà des compétitions qui interviennent presque toujours dans les associations, **les phénomènes de facilitation peuvent également jouer un rôle important et induire des gains de rendement** (Vandermeer 1989 ; Hauggaard-Nielsen et Jensen 2005). Ces mécanismes peuvent prendre des formes très variables, comme la réduction des attaques de maladies (Trenbath 1993), des adventices (Hauggaard-Nielsen et al. 2001b) ou l'augmentation de la disponibilité du phosphore pour la céréale permise par le relargage de protons via la fixation symbiotique de la légumineuse (Hinsinger 2001). Par ailleurs, plusieurs auteurs ont pu mettre en évidence, à l'aide des méthodes de dilution du ^{15}N et de compartimentation (Khan et al. 2002a, b ; Mayer et al. 2003), les effets de la légumineuse sur la facilitation de l'absorption de l'azote par la céréale (Stern 1993 ; Xiao et al. 2004). Ces phénomènes pourraient s'expliquer par la production d'exsudats riches en azote et relativement labiles par les racines de la légumineuse, exsudats qui seraient déposés dans la rhizosphère. Ces dépôts – pouvant représenter jusqu'à 5% de l'azote total de la légumineuse – se font sous forme de NH_4^+ (Brophy et Reichel 1989), de NO_3^- (Wacquant et al. 1989), d'aminoacides (Paynel et al. 2001) ou de matière organique en décomposition (Johansen et Jensen 1996) et pourraient ainsi être utilisés directement ou après bio-transformation par la céréale associée ou la légumineuse elle-même.

Les interactions entre espèces associées se font à la fois au niveau aérien pour l'interception du rayonnement et au niveau racinaire pour le prélèvement de l'eau et des minéraux. En l'absence de facteurs limitants, le rendement et la production de matière sèche dépendent essentiellement de la quantité de rayonnement absorbé (Loomis et Williams 1963) et ceci aussi bien en culture « pure » (Shibles et Weber 1966 ; Monteith 1977 ; Kiniry et al. 1989) qu'en association (Natarajan et Willey 1980a, b ; Sivakumar et Virmani 1980 ; Sivakumar et Virmani 1984). Or, le rayonnement intercepté varie de l'émergence à la récolte (Sivakumar et Virmani 1984 ; Natarajan et Willey 1985 ; Watiki et al. 1993) et dépendrait donc de la dynamique des espèces associées et notamment de leur indice foliaire (LAI) (Biscoe et Gallagher 1977).

L'une des principales hypothèses avancées pour expliquer l'avantage de l'association céréale – légumineuse pour l'amélioration du rendement et de la teneur en protéines de la céréale est une disponibilité en azote minéral par plante de céréale qui serait plus importante et mieux ajustée. Cela s'expliquerait en partie par un équilibre entre fixation et absorption d'azote minéral du sol par les deux espèces qui utilisent des sources d'azote différentes (Fujita et al. 1992 ; Tofinga et al. 1993 ; Hauggaard-Nielsen et al. 2001a, b ; Corre-Hellou 2005 ; Hauggaard-Nielsen et al. 2003 ; Corre-Hellou et Crozat 2004). Des processus similaires sont en jeu pour l'utilisation de la lumière (Berntsen et al. 2004 ; Jahansooz et al. 2007) dans le cas où les espèces associées présentent des architectures aériennes ou des dynamiques de croissance différentes et complémentaires (Trenbath 1986 ; Tsubo et al. 2001 ; Tsubo et Walker 2004 ; Poggio 2005), à ceci près qu'il n'existe qu'une source de lumière disponible contrairement à l'azote. Ces différences et complémentarités interspécifiques permettraient une meilleure occupation dynamique de l'espace et donc une augmentation de l'interception du rayonnement solaire incident tout au long de la croissance de l'association. Ces deux mécanismes, que sont l'acquisition de l'azote et l'interception du rayonnement, sont intimement liés sous la dépendance des dynamiques de croissance du système aérien et racinaire (Dreccer et al. 2000). Cela pourrait donc expliquer à la fois le gain de rendement et la réduction des adventices souvent observés (Vasilakoglou et al. 2005 ; Banik et al. 2006).

Pour autant, Wilson (1988) a pu montrer, à partir d'expérimentations utilisant des techniques de compartimentation des systèmes racinaire et/ou aérien, que dans de nombreux cas la compétition racinaire avait un effet plus important que la compétition aérienne. Les compétitions pour les ressources du sol et en particulier pour l'azote ne peuvent cependant pas être étudiées séparément des compétitions pour la lumière. En effet, l'offre en azote du sol, son acquisition par les plantes et leur croissance aérienne sont en permanente interaction (Corre-Hellou 2005). A cela s'ajoute le fait que l'accès à l'azote dépend fortement des conditions du milieu et en particulier de l'accès à l'eau. La plupart des travaux sur les associations se sont contentés le plus souvent d'étudier de manière descriptive et statique leur performance sans en analyser finement les facteurs explicatifs et alors qu'il s'agit de processus dynamiques (par exemple Dhima et al. 2007).

III.3 Complémentarités et compétitions pour l'utilisation des ressources

III.3.1. Acquisition de l'azote : de la compétition à la complémentarité

La mise en place des nodosités et de leur activité se fait progressivement chez les légumineuses (Tricot et al. 1997 ; Voisin et al. 2002). En début de cycle, céréale et légumineuse sont ainsi en compétition directe pour l'azote minéral du sol (via leurs systèmes racinaires) puisqu'il s'agit de la seule source d'azote alors disponible. Cela signifie qu'en début de croissance le partage de l'azote minéral du sol serait déterminé par des écarts

d'enracinements et de demandes entre espèces (Corre-Hellou 2005). Or, céréales et légumineuses présenteraient des différences dans la vitesse de progression du front racinaire (Hamblin et Tennant 1987) et des écarts de demandes dès le début du cycle en raison notamment d'une vitesse de croissance plus rapide de la céréale (Bellostas et al. 2003 ; Andersen et al. 2004). La céréale devrait ainsi être avantagée dans la compétition précoce pour l'azote du sol du fait de son accès à une plus grande part de cette ressource traduisant une compétitivité interspécifique de la céréale supérieure à celle de la légumineuse (Jensen 1996).

Cette compétitivité plus forte de la céréale pour l'azote du sol se traduirait par une diminution rapide de la quantité d'azote minéral disponible dans l'horizon superficiel (zone de la fixation symbiotique), qui aurait pour conséquence une augmentation de l'activité fixatrice de la légumineuse comparativement aux cultures « pures » et ceci afin de répondre à ses besoins en azote (Crozat et al. 1994 ; Voisin et al. 2002). Par conséquent, plus le pourcentage de l'azote absorbé par la légumineuse issu de la fixation symbiotique est important plus la quantité d'azote prélevée dans le sol par la légumineuse sera faible. Une augmentation de la fixation symbiotique se traduira ainsi par une disponibilité en azote pour le blé dur en association plus ou moins identique à celle du blé dur en culture « pure ». Or, si le rendement de la céréale en association est inférieur à celui de la culture « pure » (ce qui est quasi systématiquement le cas) alors la disponibilité en azote par plante, épis et grains de blé dur sera supérieure en association. Cette plus grande quantité d'azote remobilisée dans les grains (Ofori et Stern 1987 ; Jensen 1996) aura pour conséquence une amélioration de la teneur en protéines de la céréale. Par ailleurs, la demande en azote d'une céréale n'est pas linéaire mais dépend du stade de développement et du niveau de production. Ainsi, seul un écart de disponibilité en azote à un stade où les besoins de la culture sont forts permettra de réduire la carence azotée de la céréale comparativement à la culture « pure » et donc d'accroître sa qualité et sa production relative. Pour autant, dans le cas de disponibilités en azote non limitantes, cet effet sera faible voire nul justifiant l'intérêt des associations dans les systèmes à faible disponibilité en azote.

III.3.2. Les associations permettraient une meilleure acquisition de la lumière

Les plantes supérieures interceptent le rayonnement par l'intermédiaire de leurs feuilles et des autres organes verts, utilisent l'énergie lumineuse pour la photosynthèse et les assimilas carbonés pour la production de biomasse. Lorsque les facteurs tels que eau, minéraux, maladies, ravageurs et mauvaises herbes ne sont pas limitants, le rendement et la matière sèche produite par une culture dépend essentiellement de la quantité du rayonnement absorbée (Loomis et Williams 1963). Dans les associations, en raison de l'hétérogénéité spatiale du couvert, l'énergie lumineuse est avant tout disponible pour l'espèce dominante. Par conséquent, l'efficience d'interception du rayonnement ne dépendrait pas uniquement de l'indice foliaire et du coefficient d'extinction de chaque espèce (Sinoquet et Caldwell 1995) mais également de la hauteur et de la dynamique de croissance des espèces associées. Plus précisément, la compétitivité d'une espèce pour l'acquisition de la lumière et donc pour la production de biomasse dépendrait de son LAI, de son architecture foliaire, de sa hauteur et de sa dynamique de croissance relativement à celle de l'autre espèce associée (Fukai 1993 ; Midmore 1993). La plupart des auteurs s'accordent sur le fait que le partage du rayonnement dans les associations est en premier lieu influencé par les compétitions verticales (Spitters et Aerts 1983 ; Caldwell 1987 ; Cudney et al. 1991 ; Cenpukdee et Fukai 1992a, b) et en second lieu par l'orientation des rangs et le coefficient d'extinction des feuilles de chaque espèce. Dans certaines situations, les différences entre espèces pour l'accès à la ressource lumineuse peuvent avoir des conséquences parfois fatales sur l'espèce dominée (Caldwell 1987) alors qu'un ombrage partiel pourrait réduire les stress hydriques (Allen et al. 1977) et améliorer la

photosynthèse et l'efficience d'utilisation du rayonnement (RUE) de l'espèce dominée (Marshall et Willey 1983 ; Stirling et al. 1990) comparativement à l'espèce « pure ». Par ailleurs, les phénomènes d'ombrage se traduiraient également au niveau des organes photosynthétiques par des feuilles plus fines, une diminution du poids spécifique des feuilles et une augmentation de l'indice foliaire spécifique (Crookston et al. 1975 ; Sivakumar et Virmani 1980 ; Stirling et al. 1990 ; Watiki et al. 1993 ; Tsubo et al. 2001). Enfin, Hang et al. (1984) ou encore Stirling et al. (1990) ont également mis en évidence que la hauteur des plantes était accrue en réponse à la compétition pour la lumière alors que la biomasse par plante était réduite.

En association, la structure foliaire des espèces cultivées dépendrait donc à la fois des caractéristiques morphogénétiques de chaque espèce mais également de la structure spatiale du peuplement ainsi que de la réponse de chaque espèce au statut azoté et plus généralement de la réponse aux compétitions inter- et intraspécifiques. Le statut azoté – qui est un indicateur du niveau de satisfaction de la demande en azote de la culture (Lemaire et Gastal 1997) – constitue un facteur déterminant de la croissance foliaire (Gastal et Lemaire 1988). Par conséquent, la disponibilité en azote influerait sur le partage du rayonnement en modifiant la proportion de chaque espèce dans la surface foliaire totale de l'association. Tsubo et walker (2002) ont par ailleurs montré, en utilisant un modèle de partition du rayonnement dans les associations maïs – pois, que l'efficience d'utilisation du rayonnement (RUE) de l'espèce dominée était supérieure à celle de l'espèce dominante. Pour autant, Gosse et al. (1986) ont mis en évidence sur des associations orge – pois que l'efficience de conversion du rayonnement en biomasse du pois était inférieure à celle de la céréale, en raison principalement du coût énergétique de la fixation symbiotique. Enfin, Gastal et Bélanger (1993) ont quant à eux montré que l'offre en azote modifiait davantage la surface foliaire que l'efficience de conversion du rayonnement.

IV. Itinéraires techniques et effets des choix techniques sur le fonctionnement et la performance des associations

IV.1 La notion d'itinéraire technique

Un itinéraire technique est la combinaison logique et ordonnée des techniques mises en œuvre sur une parcelle agricole en vue d'en obtenir une production (Sebillotte 1974) en considérant l'existence d'interactions fortes entre les techniques (choix des espèces, variétés, dates de semis, densité de semis, fertilisation, protection phytosanitaire, etc.). Par conséquent l'itinéraire technique constitue un ensemble cohérent où le choix d'une technique ne peut être raisonné indépendamment de celui de l'ensemble des autres techniques. Par ailleurs, la notion d'itinéraire technique doit être vu comme un objet dynamique dont l'évaluation et la conception (d'un ensemble cohérent de pratiques agricoles) ne peuvent se faire qu'en référence à un objectif de production qui peut renvoyer à des considérations aussi bien économiques, environnementales, d'organisation du travail que de qualité des produits.

IV.2 Effet des techniques culturales sur le fonctionnement des associations

Les différents éléments de l'itinéraire technique n'ont pas pu être étudiées au cours de cette thèse pour des raisons évidentes de temps et de faisabilité. Par ailleurs ne disposant que de peu d'informations sur le fonctionnement des associations de cultures d'hiver notre travail a été dans un premier temps exploratoire et analytique. Dès lors nous avons dû limiter notre analyse à quelques éléments de l'itinéraire technique qui, à dire « d'experts » ou d'après la bibliographie, nous ont apparu comme des déterminants possibles de la performance et du fonctionnement des associations. Par conséquent, nous traiterons seulement du choix : i) des espèces, ii) des variétés, iii) des densités de semis, iv) de la structure du couvert et v) de la fertilisation azotée. D'autres éléments comme la date de semis, la fertilisation phosphatée, l'irrigation mais également la protection phytosanitaire peuvent également modifier le fonctionnement et la performance des associations mais ne seront pas analysés en détails pour les raisons précédemment évoquées.

Dans cette partie nous n'expliciterons pas les relations et la cohérence nécessaire entre les différents éléments de l'itinéraire technique en lien avec les objectifs de production mais nous essayerons autant que possible de montrer en quoi les éléments de l'itinéraire technique retenus peuvent avoir une influence sur le fonctionnement et la performance de l'association. Pour ce faire nous nous appuierons principalement sur l'analyse bibliographique mais sans nécessairement détailler précisément tous les mécanismes mis en jeu puisque seule une analyse globale de l'itinéraire technique est pertinente. D'un point de vue pratique, cette partie est organisée comme si la conception de l'itinéraire technique se faisait de façon linéaire et analytique en définissant chaque choix chronologiquement du plus large au plus précis : choix des espèces, des variétés, des densités…Il s'agit donc là d'une conceptualisation qui, si elle ne correspond pas réellement au cheminement de la pensée du décideur, a au moins l'avantage de permettre une description compréhensible des relations entre les différents éléments qui composent l'itinéraire technique.

IV.2.1. Quelles espèces et variétés à associer ?

Le choix de l'espèce, qui plus est des deux espèces dans le cas des associations, est un élément essentiel dans l'objectif d'optimiser leur performance car celle-ci dépendrait de : i) la complémentarité entre les espèces pour l'utilisation des sources d'azote et ii) la complémentarité spatiale et temporelle des espèces (Trenbath 1986 ; Tsubo et al. 2001 ; Tsubo et Walker 2004 ; Poggio 2005) pour l'utilisation de l'énergie lumineuse (Berntsen et al. 2004 ; Jahansooz et al. 2007). Par ailleurs et pour ces mêmes raisons, pour un couple d'espèces donné, le choix de la variété est un autre levier à considérer, levier qui sera d'autant plus important que la variabilité des variétés sera large. En effet, des variétés présentant des dynamiques de croissance, des hauteurs, des architectures foliaires et des demandes en azote similaires auront *a priori* le même effet sur la culture associée, tout du moins d'un point de vue de l'interception du rayonnement et de l'acquisition de l'azote. Il en va de même pour le choix des espèces.

La plupart des programmes de sélection sont basés sur des systèmes monospécifiques (Davis et Woolley 1993 ; Nelson et Robichaux 1997 ; O'Leary et Smith 1999) et ce sont ces mêmes variétés qui sont le plus souvent utilisées dans les associations. Or, Carr et al. (1998) ont montré que la production de fourrage d'associations orge – pois ou avoine – pois était supérieur lorsque les variétés de céréales utilisées avaient été sélectionnées dans des couverts plurispécifiques par rapport aux associations utilisant des variétés issues de sélection dans des couverts monospécifiques. Identifier les traits spécifiques et variétaux adaptés pour les

associations est par conséquent un enjeu majeur en raison des interactions entre génotype et environnement qui inclut l'espèce associée.

En raison de la complémentarité entre les espèces associées pour l'utilisation de l'azote et de la lumière, mais également de la plus forte compétitivité de la céréale pour l'utilisation de l'azote du sol et de la lumière, on peut faire l'hypothèse que les variétés de céréales à associer doivent avoir : i) un système racinaire présentant une forte compétitivité pour l'utilisation de l'azote minéral du sol, ii) une bonne tenue de tige et iii) une architecture aérienne et une production de biomasse permettant la diffusion d'une quantité raisonnable de lumière au couvert dominé. Ces conditions devraient effectivement permettre à la légumineuse d'une part d'accroître sa fixation symbiotique par un épuisement rapide de la quantité d'azote minéral dans l'horizon superficiel et d'autre part d'accéder à une quantité de lumière suffisante pour permettre une production raisonnable de biomasse. De même, les légumineuses (espèces et variétés) optimales à associer devraient idéalement présenter : i) une compétitivité moyenne du système racinaire nécessaire pour qu'elle puisse accéder à une quantité suffisante d'azote minéral du sol et de nutriments pendant les stades précoces (avant la mise en place de la fixation symbiotique) et ii) une mise en place rapide de l'activité fixatrice afin de réduire la période de possible déficience dans la nutrition azotée qui pourrait limiter sa croissance.

Ces critères de choix des variétés dépendent bien évidement de l'objectif de l'association, ce qui rend difficile leur généralisation. Il en va de même des choix en terme d'espèces. Dans le cas des associations blé dur – pois d'hiver par exemple, on s'attend à ce que le blé dur soit toujours l'espèce dominante en raison de sa précocité, du niveau de production de biomasse et de sa hauteur relativement à celle du pois d'hiver. Pour autant, la compétitivité du blé dur pour la lumière sera moindre dans le cas d'une association avec du pois d'hiver fourrager comparativement à une association avec un pois protéagineux d'hiver de type *afila* (sans feuille). Dans le cas d'une association entre le blé dur et la féverole d'hiver, la légumineuse devrait être plus compétitive du fait de sa hauteur, de son LAI et de sa biomasse supérieurs à ceux du blé dur. En conséquence, une variété de blé dur que l'on considèrera comme très compétitive dans un mélange blé dur – pois d'hiver ne le sera peut-être pas (ou moins) dans le cas d'un mélange blé dur – pois d'hiver fourrager ou blé dur – féverole d'hiver. De même, pour une espèce et une variété de légumineuse données, un blé dur à paille courte sera certainement moins compétitif qu'une variété à paille haute.

IV.2.2. Quelles densités de semis ?

Pour un couple d'espèces et de variétés donné se pose la question des densités de semis. Si les densités recommandées pour les couverts monospécifiques sont relativement bien connues pour la plupart des cultures (Bulson et al. 1997) cela n'est pas le cas pour les associations d'espèces. Dans une association, le degré de complémentarité pour l'utilisation des ressources, le rendement total mesuré et la contribution relative des individus sont déterminés par les compétitions inter- et intraspécifiques, elles-mêmes influencées à la fois par la disponibilité des ressources et la densité à laquelle sont semées les composantes de l'association (Vandermeer 1989). En première approximation la plupart des auteurs réalisent des expérimentations en semant chaque espèce à une densité égale à la moitié de celle des cultures « pures ».

Les composantes de l'association utilisant plus efficacement les ressources du milieu que les cultures « pures », les mélanges d'espèces pourraient supporter un nombre de plantes supérieur aux couverts monospécifiques. La densité optimale dans les associations pourrait donc être supérieure à celle de chacune des cultures « pures », comme cela a été mis en évidence dans le cas d'associations maïs – haricot par Willey et Osiru (1972). Cependant, par nature, l'augmentation de la densité des plantes accroîtrait les compétitions entre les

composantes de l'association (Willey et Osiru 1972) ce qui, comme l'a noté Willey (1979), favoriserait l'espèce dominante. Le choix de la densité de semis à laquelle chaque espèce doit être semée dans le mélange est ainsi d'une grande importance dans l'optimisation de l'efficacité de l'association et notamment de son rendement. Ceci est d'autant plus vrai pour les mélanges céréale – légumineuse (Ofori et Stern 1987).

Il est utile d'apporter un complément à l'hypothèse de Willey et Osiru (1972) selon laquelle la densité optimale dans les associations pourrait être supérieure à la densité optimale de chacune des cultures « pures ». La notion de densité semble en effet peu adaptée lorsque l'on associe des espèces dont les densités de semis en culture « pure » sont très différentes l'une de l'autre. Prenons par exemple le cas du blé dur et du pois d'hiver dont les densités recommandées en cultures « pures » sont autour de 300 et 60 plantes m^{-2} respectivement. Dans le cas d'une association où chaque espèce serait semée à une densité égale à 50% des cultures « pures » nous aurions 150 et 30 plantes m^{-2} de blé dur et de pois d'hiver respectivement. Au total la densité de plantes serait donc de 180 plantes m^{-2} soit moins que celle du blé dur « pur » mais plus que celle du pois d'hiver « pur ». Dès lors, comme l'ont proposé Hauggaard-Nielsen et al. (2006), il est préférable d'utiliser la notion de densité relative (DR) qui est la somme des densités relatives partielles du blé dur ($DRp_{Blé}$) et du pois d'hiver (DRp_{Pois}) :

$$DRp_{Blé} = \frac{\text{Densité Blé en association}}{\text{Densité Blé en culture pure}}$$

$$DRp_{Pois} = \frac{\text{Densité Pois en association}}{\text{Densité Pois en culture pure}}$$

$$DR = DRp_{Blé} + DRp_{Pois}$$

La recherche d'une densité optimale doit être raisonnée en considérant le choix des espèces, des variétés et des objectifs. Dans le cas des couverts monospécifiques, la réponse à la densité est généralement bien connue et le choix de la densité optimale se fait de façon à garantir un potentiel de rendement maximal en considérant les pertes de plantes à la levée et en hiver ou pour compenser une faible croissance des plantes. Les préconisations en termes de densité de semis sont de fait souvent supérieures à la densité minimale permettant de réaliser le rendement maximal. Les choix en termes de densité intégrant le coût économique des semences, on cherche quand même à ne pas trop surestimer la densité de semis, en particulier dans le cas des céréales qui ont la capacité de compenser plus ou moins totalement un peuplement trop clair par tallage. Par contre, dans le cas d'autres cultures comme la féverole d'hiver par exemple, il est important de ne pas trop surestimer la densité de semis de façon à éviter un étiolement important des plantes qui peut dans certaines conditions accroître le risque de verse.

Dans le cas de mélanges, la problématique est légèrement plus complexe puisqu'il s'agit de prendre en considération les compétitions intraspécifiques dont on connaît relativement bien les mécanismes mais qui sont en interaction avec les compétitions interspécifiques. Dans le but d'optimiser l'utilisation des ressources du milieu, il s'agit donc de jouer sur le rapport entre compétitions inter- et intraspécifiques pour lequel nous ne disposons que de peu d'informations. Par ailleurs, il est raisonnable de penser qu'il soit possible de déterminer les densités optimales de peuplement et, en considérant d'éventuelles pertes à la levée, d'en déduire les densités de semis optimales. Pour autant l'une des difficultés supplémentaires inhérentes aux associations vient du fait que, une année donnée, une espèce peut avoir une levée inférieure à l'autre, ce qui pose donc la question du pilotage du peuplement pour atteindre l'objectif fixé ou pour réadapter cet objectif.

IV.2.3. Influence de la structure du couvert

La structure des associations modifierait le partage du rayonnement, et en particulier la quantité de lumière transmise à la plus petite des deux espèces, mais également les compétitions interspécifiques vis-à-vis de l'eau et des nutriments. Pour ce qui est de l'orientation des rangs aucune influence sur l'interception du rayonnement lumineux n'a été relevée à la fois en cultures monospécifiques (Steiner 1986) qu'en cultures associées (Tsubo et al. 2001, dans le cas de mélanges maïs – pois). On peut distinguer plusieurs types d'organisation spatiale entre les espèces en association (Sullivan 2001) : i) les mélanges intimes où il n'existe pas d'organisation particulière entre les espèces associées, ii) les mélanges en rang qui consistent en l'alternance d'un rang de chaque espèce et iii) les mélanges en bandes qui consistent en l'alternance de bandes monospécifiques plus ou moins larges. Dalal (1974) a montré que dans le cas d'associations maïs – ambrevade (*Cajanus cajan*) le rendement du maïs était similaire entre les associations en rang et les cultures « pures » mais significativement réduit lorsque les deux espèces étaient mélangées sur le même rang. Mohta et De (1980) ont eux montré dans le cas d'associations maïs – soja et sorgho – soja que les rendements du maïs et du sorgho étaient similaires que les associations consistent en l'alternance d'un rang de céréale et d'un rang de légumineuse (1x1) ou de deux rangs de chaque espèce (2x2). Par contre ils ont observé que le rendement du soja était supérieur dans les situations 2x2 par rapport aux associations 1x1. Chen et al. (2004) ont quant à eux montré, pour des associations orge – pois, que le rendement du pois dans les associations 4x4 était supérieur à celui du pois dans les associations 2x2 qui lui même était supérieur à celui des mélanges intimes et inversement pour le rendement de l'orge et pour le rendement total de l'association.

IV.2.4. Effet de la fertilisation azotée sur les associations

En raison de leur capacité à fixer l'azote de l'air, les légumineuses – lorsqu'elles sont cultivées seules – ne sont généralement pas fertilisées. Par contre, les céréales – et le blé dur en particulier – sont généralement fertilisées avec des niveaux d'azote importants afin de répondre à leurs besoins azotés nécessaire pour optimiser leur rendement et leur teneur en protéines (Garrido-Lestache et al. 2004). Le niveau de fertilisation optimal des associations reste donc à définir et dépend là encore des objectifs de production. En raison de la complémentarité significative entre les deux espèces associées pour l'utilisation des sources d'azote on s'attend néanmoins à ce que le niveau de fertilisation optimal soit inférieur à la moyenne de la fertilisation recommandée pour les cultures « pures ». Cela signifie que l'association serait particulièrement efficace vis-à-vis des cultures « pures » dans les situations à faible disponibilité en azote.

L'avantage de l'association pour la production à la fois quantitative et qualitative des grains dépendrait donc fortement de la fertilisation azotée. Hauggaard-Nielsen et Jensen (2001) ont ainsi montré que la performance de l'association orge – pois de printemps était maximale en absence de fertilisation azotée et significativement réduite avec l'apport d'azote et ceci principalement en raison de la forte réduction du rendement du pois dans l'association fertilisée. Des résultats similaires ont été obtenus dans le cas d'associations de printemps blé dur – pois (Ghaley et al. 2005) confirmant une plus forte compétitivité de la légumineuse dans les situations à faible disponibilité en azote et inversement pour la céréale.

La fertilisation azotée aurait par ailleurs un effet sur la dynamique de croissance des différentes espèces dans l'association (Ghaley et al. 2005) avec en particulier une augmentation de l'énergie lumineuse absorbée avec la quantité d'azote apportée. Corre-Hellou (2005) a montré dans le cas de mélanges orge – pois que – si la fertilisation n'avait pas d'effet significatif sur le rendement total en raison d'une meilleure utilisation des sources d'azote – la proportion d'orge dans le mélange était significativement augmentée avec

la disponibilité en azote et ceci au détriment du pois. Des résultats similaires ont été obtenus par Ghaley et al. (2005) dans le cas d'associations de printemps blé dur – pois mais également dans le cas d'autres associations à base de céréale et de légumineuse cultivées sous des climats arides, semi-arides, tempérés et tropicaux (Ofori et Stern 1987 ; Fujita et al. 1992 ; Jensen 1996 ; Bulson et al. 1997).

V. Objectifs, hypothèses et organisation du manuscrit

V.1 Objectifs de la thèse

L'objectif de la thèse est tout d'abord d'étudier la performance des associations blé dur – légumineuse à graines dans le cas de cultures d'hiver vis-à-vis des cultures monospécifiques correspondantes. Une simple analyse de cette performance sans en comprendre les tenants et les aboutissants ne présenterait cependant qu'un intérêt limité et en particulier cela ne permettrait pas à terme d'optimiser ces systèmes innovants. De plus, étant donné le nombre de combinaisons possibles entre les différents éléments techniques décrits précédemment et les autres que nous n'avons pas considérés, une telle analyse aurait nécessairement une portée limitée par manque de généricité. Par conséquent, cette thèse ne se limitera pas à analyser la performance des associations mais elle cherchera autant que possible à comprendre et décrire les mécanismes à l'échelle du peuplement au champ.

En outre l'objectif de cette thèse se veut être finalisé en apportant des informations utiles pour la conception d'itinéraires techniques performants et réalistes. Cela revient à déterminer quelles sont les espèces à associer, les variétés, les dates et densités de semis, les niveaux de fertilisation, les structures de couvert à privilégier en fonction des différents objectifs de production. Tout ceci bien sûr en n'oubliant pas de prendre en compte les risques climatiques. Cet objectif ambitieux peut difficilement être envisagé dans une thèse en raison de l'infinité de combinaisons et des contraintes de temps. Pour autant, nous tâcherons autant que possible de proposer des méthodes d'analyse et des pistes de réflexion pour la conception d'itinéraires techniques d'associations qui soient adaptés à différents objectifs de production.

Pour ce faire nous avons défini des hypothèses générales sur le fonctionnement supposé des associations en détaillant autant que possible les leviers techniques dont on dispose et qui pourraient interagir avec leur développement et croissance.

Par ailleurs, ce travail de thèse a été l'occasion de développer une réflexion méthodologique quant aux méthodes et critères à utiliser pour étudier et comprendre les processus dans les cultures associées. En particulier nous avons mené une réflexion sur le choix des indicateurs à utiliser pour en décrire la performance et les interactions entre espèces et plus largement sur les expérimentations nécessaires et les mesures indispensables à réaliser notamment d'un point de vue dynamique.

V.2 Hypothèses générales et hypothèses en lien avec les choix techniques

H1. Les associations permettraient d'améliorer la performance quantitative par rapport aux cultures monospécifiques

H2. Les associations permettraient d'améliorer la teneur en protéines du blé dur par rapport à la culture « pure »

- **H2.1** L'augmentation de la teneur en protéines du blé dur serait permise par une réduction du nombre de talles, épis et grains par unité de surface

H3. Pour un niveau de production donné le besoin en fertilisation azotée de l'association serait inférieur à celui du blé dur « pur »

- **H3.1** La performance de l'association vis-à-vis de l'azote s'expliquerait par un accroissement de la fixation symbiotique de la légumineuse en association
- **H3.2** La fertilisation azotée diminuerait la production de la légumineuse et augmenterait celle du blé dur
- **H3.3** L'association serait d'autant plus performante que la disponibilité en azote serait faible

H4. Les associations utiliseraient plus efficacement l'énergie lumineuse comparativement aux cultures « pures »

- **H4.1** La complémentarité des espèces pour l'utilisation de la lumière serait d'autant plus forte que les espèces auront des cycles ou des architectures aériennes complémentaires
- **H4.2** La disponibilité en azote modifierait la croissance des espèces et donc leur complémentarité pour l'utilisation de la lumière

H5. Les associations permettraient de diminuer le recours aux pesticides comparativement aux cultures « pures »

- **H5.1** Les associations permettraient de réduire les attaques de pucerons et de sitones comparativement aux légumineuses « pures »
- **H5.2** Les associations permettraient de réduire les maladies du blé dur et des légumineuses
- **H5.3** Les associations permettraient de réduire l'enherbement comparativement aux cultures « pures » de légumineuse

H6. Les associations réduiraient le risque de lixiviation de nitrate comparativement aux légumineuses « pures »

- **H6.1** Le reliquat azoté à la récolte serait réduit comparativement aux légumineuses « pures »

V.3 Organisation du manuscrit

La suite du manuscrit de cette thèse est organisée en quatre chapitres :

Un chapitre matériels et méthodes présentant : 1) la stratégie adoptée dans le choix des expérimentations, 2) les expérimentations année par année, 3) les mesures et calculs réalisés, 4) les conditions pédo-climatiques des différents essais et 5) une comparaison de différents indices permettant l'évaluation de la performance des associations et des interactions entre espèces.

Un premier chapitre de résultats ayant pour objectif d'évaluer la performance des associations d'un point de vue du rendement, de la qualité du blé dur en considérant séparément les associations blé dur – pois d'hiver et blé dur – féverole d'hiver.

Un second chapitre de résultats dont l'objectif est d'analyser en dynamique le fonctionnement des associations et en particulier les compétitions interspécifiques et intraspécifiques d'un point de vue de l'utilisation de l'azote et de la lumière dans les associations blé dur – pois d'hiver. En particulier, différents indices seront utilisés dans le but de comprendre l'élaboration du rendement du blé dur en mélange avec du pois d'hiver.

Le dernier chapitre du manuscrit concernera la conception d'itinéraires techniques pour des associations en s'intéressant tout d'abord à la démarche utilisée pour la conception par expertise et ensuite à leur évaluation agronomique, technique et économique.

Une synthèse des principaux résultats suivie d'une réflexion sur les perspectives et thématiques de recherche à développer, en particulier pour la conception d'itinéraires techniques adaptés aux mélanges d'espèces, viendront conclure ce manuscrit.

CHAPITRE II

MATERIELS ET METHODES

I. Stratégie adoptée dans le choix des expérimentations

Notre travail visant à évaluer le fonctionnement et la performance de cultures associées de blé dur et de légumineuse à graines est basé sur trois expérimentations menées en plein champ en 2005-2006, 2006-2007 et 2007-2008 et destinées à présenter une large gamme de variabilité en termes de compétitions pour les ressources du milieu obtenue en utilisant entre autres différents cultivars de blé dur, différentes espèces de légumineuses, différents niveaux de disponibilité en azote, différentes densités de peuplement et différentes structures de couverts.

I.1 2005-2006 : Exploration des possibles

Hormis quelques données bibliographiques, nous ne disposions avant cette première campagne d'essai que de peu d'éléments sur le fonctionnement des associations dans le cas de cultures d'hiver. Par conséquent nous avons mis en place un essai de type « criblage » afin d'explorer une large gamme des possibles avec trois objectifs : i) évaluer la performance d'associations céréale – légumineuse à graines, ii) analyser le fonctionnement des associations et iii) identifier des facteurs déterminants à étudier ultérieurement.

Pour ce faire nous avons mis en place un essai de type split-plot non orthogonal comparant pour trois niveaux de fertilisation, quatre variétés de blé dur dont une variété en cours de sélection pour des critères d'agriculture biologique, une variété de pois protéagineux d'hiver et une variété de féverole d'hiver.

Etant donné l'objectif de l'essai avant tout exploratoire, toutes les combinaisons entre variétés de blé dur, légumineuses et niveaux de fertilisation n'ont pas été testées. Néanmoins, une association nous servant de témoin a été évaluée sur l'ensemble des niveaux de fertilisation et a fait l'objet d'un suivi régulier de l'évolution de la biomasse dans le but d'analyser la dynamique de croissance des espèces en association comparativement aux cultures « pures ». Afin de comparer la performance des associations avec les cultures « pures » respectives, toutes les espèces et variétés ont ainsi été testées en couverts monospécifiques et dans certains cas dans des couverts monospécifiques semés en demie densité.

Les résultats de cet essai nous ont permis entre autre de mettre en évidence les effets de la fertilisation azotée, du cultivar de blé dur et de l'espèce de légumineuse sur la performance et le fonctionnement des associations. Ce premier essai nous a également montré la nécessité d'avoir comme référence les couverts monospécifiques en densité normale et en demie densité pour toutes les variétés et niveaux de fertilisation en accord avec le schéma proposé par Cruz et Soussana (1997) (cf. **Chapitre I, Partie III**).

I.2 2006-2007 : Comprendre les processus

L'essai 2006-2007 s'inscrivait donc dans la continuité du travail d'exploration débuté en 2005-2006 et visait à élargir la gamme de compétitions pour répondre à deux objectifs principaux : i) compléter notre connaissance du fonctionnement et des mécanismes de compétition dans les associations blé dur – légumineuse à graines et ii) évaluer les performances en dynamique des associations.

Pour répondre à ces objectifs nous avons mis en place un essai de type split-split-plot en considérant : i) quatre niveaux de fertilisation azotée différents en termes de date et de quantité d'apports afin d'évaluer l'effet de la disponibilité dynamique de l'azote sur la proportion des deux espèces et sur les dynamiques de compétition, ii) quatre variétés de blé dur différant par leur taille, port de feuilles, tallage, potentiel de rendement et qualité technologique ont été évaluées et iii) 2 légumineuses pouvant être semées en hiver : une féverole et un pois protéagineux.

I.3 2007-2008 : Evaluation d'itinéraires techniques conçus à dire « d'experts »

A la différence des essais de 2005-2006 et 2006-2007 l'objectif de cette troisième campagne d'essai était de tester des itinéraires techniques conçus par expertise en cherchant à ce qu'ils soient réalisables, cohérents, couvrant une large gamme de systèmes de production et répondant à des combinaisons différenciées d'objectifs et de contraintes de production aussi bien scientifiques qu'agricoles et dont la finalité restait la production de blé dur de qualité en système bas-intrants

Cet essai avait pour objectifs de : i) confirmer notre compréhension du fonctionnement des associations, ii) réaliser une première évaluation des performances économique et agronomique des associations dans des situations plus proches du contexte agricole et iii) évaluer la performance des associations vis-à-vis des maladies et ravageurs et de manière plus générale des intérêts agro-environnementaux en bas-intrants. En particulier différentes densités, espèces de légumineuses, variétés de blé dur, dates de semis, structures, niveaux de fertilisation et de protection phytosanitaire ont été testées et comme précédemment les couverts monospécifiques correspondants ont été mis en place pour servir de référence.

II. Description des traitements expérimentaux retenus

II.1 Généralités

Sur chaque essai nous avons cherché à comparer les cultures monospécifiques semées aux densités recommandées avec les associations où chaque espèce est semée en rang à une densité égale à la moitié des cultures « pures ». Dans certaines situations, en accord avec le schéma proposé par Cruz et Soussana (1997) (cf. **Chapitre I, Partie III**) nous avons également utilisé les cultures monospécifiques semées à la même densité que les associations (50% de la densité recommandée en culture « pure »).

Les espèces testées ont été le blé dur (*Triticum turgidum* L.) pour la céréale et pour les légumineuses à graines : le pois protéagineux d'hiver (*Pisum sativum* L.) et la féverole d'hiver (*Vicia faba* L.). Une seule variété de pois d'hiver a été testée (Lucy – GAE Recherche) de type *afila*, tardive, à petits grains lisses et verts présentant une bonne résistance au froid et à la verse, assez courte et ayant une productivité élevée. De même une seule variété de féverole d'hiver a été évaluée (Castel – SEMAGRA) de type hiver à alternative, précoce, courte, présentant une excellente tenue de tige, une bonne résistance au froid, un taux de nouaison très élevé permettant des rendements élevés et une bonne teneur en protéines. Ces deux cultivars de légumineuses à graines ont l'avantage de pouvoir être semés en hiver car ils ont une bonne tolérance au froid et sont partiellement sensibles à la photopériode.

Lors des essais, plusieurs variétés de blé dur ont été évaluées (Nefer, Neodur, Acalou, Orjaune et la lignée L1823 en cours d'évaluation). Les caractéristiques des variétés de blé dur sont décrites dans le **Tableau 1** à l'exception de L1823 pour laquelle ces données ne sont pas encore disponibles car actuellement en cours de sélection, notamment selon des critères d'agriculture biologique (compétition vis-à-vis des adventices, teneur en protéines supérieure en situation de faible disponibilité en azote…). Le **Tableau 1** montre des différences entre les variétés du point de vue de leur hauteur de paille (Acalou étant la plus petite et Orjaune la plus élevée) et de leur teneur en protéines (moindre pour Nefer et maximale pour Neodur) et des sensibilités similaires aux maladies à l'exception de la rouille brune et de la rouille noire. La variété L1823 pourrait être particulièrement adaptée aux systèmes bas intrants car elle serait fortement compétitive vis-à-vis des mauvaises herbes en raison d'une hauteur de paille élevée et d'un tallage important. Elle serait également relativement résistante aux maladies et présenterait une qualité technologique satisfaisante y compris dans les situations à bas niveaux d'intrants azotés.

Différents niveaux de fertilisation azotée (ammonitrate 33.5) ont été évalués au cours des essais sur le blé dur « pur » et sur les associations alors que les légumineuses « pures » ont toujours été cultivées sans apport d'engrais. Nous faisons effectivement l'hypothèse que l'azote n'est pas une ressource limitante pour les légumineuses du fait de leur capacité à accroître la fixation symbiotique de l'azote de l'air pour répondre à leur besoin (e.g. Li et al. 2008). Toutefois il est possible que cette hypothèse puisse être mise en défaut en cas de forte attaque de sitones (Doré et Meynard 1995).

Afin d'éviter autant que possible la présence de facteurs limitants d'origine biotique lors des essais, nous avons utilisé des semences traitées, un désherbage chimique en pré-levée et une protection chimique raisonnée contre les maladies et les ravageurs à l'exception de certains itinéraires techniques en 2007-2008.

Les semis ont été réalisés avec un semoir expérimental pneumatique monograine de précision (6 rangs, inter-rang 29 cm) en un passage pour les cultures « pures » en demie densité et en deux passages (11 rangs, inter-rang 14.5 cm) pour les associations et les cultures « pures » en pleine densité (sauf indication contraire) en décalant le second passage de 14.5 cm et en bloquant un rang extérieur. L'association consistait donc en 6 rangs de blé dur et 5 rangs de légumineuse espacés de 14.5 cm et alternés (sauf indication contraire). En 2007-2008, des associations blé dur – pois d'hiver ont également été semées à l'aide d'un semoir agricole à céréales permettant le mélange des espèces sur le rang. La longueur des parcelles était de 6, 10 et 12 m respectivement en 2005-2006, 2006-2007 et 2007-2008 pour une largeur de 1.74 m.

Variété Obtenteur Mainteneur Année d'inscription	Facteurs de régularité du rendement															Qualité technologique						
				Accidents climatiques				Maladies								Valeur semoulière		Couleur			Valeur pastière	
	Alternativité	Précocité d'épiaison	Hauteur	Froid	Verse	Germination sur pied	Egrenage	Rouille jaune	Rouille brune	Rouille noire	Piétin verse	Oïdium	Fusariose épis	Septoriose (nodorum)		Mitadinage	Poids de 1000 grains	Indice de jaune	Indice de brun	Résistance à la moucheture	Teneur en protéines	Etat de surface
Acalou Rustica Prograin Génétique SA Euralis Semences 1991	9	6,5	Très courte à courte	4.5	8.0	3.0	7.0	6.0	8.0	3.0	1.0	7.0	3.0	4.0		5.0	7.0	7.0	7.0	4.0	6.0	7.5
Nefer Verneuil Recherche SA Verneuil Recherche SA 1997	9	6	Courte	2.5	3.5	4.0	7.0	8.0	7.0	4.0	1.0	7.0	4.0	6.0		6.0	7.5	6.5	6.5	8.0	5.0	6.5
Néodur GAE Recherche SA GAE Recherche SA 1987	9	6,5	Courte	1.5	6.0	2.0	8.0	6.0	2.0	8.0	2.0	6.0	5.0	5.0		6.5	7.0	7.5	6.5	4.0	7.0	7.0
Orjaune Südwestdeutsche Saatzucht Ets CC Benoist SA 1996	8	6	Courte à moyenne	2.0	4.0	3.0	8.0	6.0	2.0	7.0	2.0	6.0	5.0	5.0		5.0	7.0	8.5	6.5	7.0	6.0	6.5

Tableau 1 *Caractéristiques des différentes variétés utilisées obtenues par le GEVES dans le cadre de l'expérimentation CTPS (Source : Les variétés de céréales du catalogue officiel français – n°4 2005) : i) alternativité qui indique le besoin en froid des variétés variant de 1 (Très hiver) à 9 (Printemps), ii) précocité d'épiaison variant de 1 (Très tardif) à 9 (Très précoce), iii) qualité technologique allant de 1 (Qualité médiocre) à 9 (Très bonne qualité) et iv) sensibilité aux accidents climatiques et aux maladies variant de 1 (Très sensible) à 9 (Résistant).*

II.2 Essai 2005-2006 : Exploration des possibles

Le dispositif expérimental est construit en split-plot avec les traitements azotés pour bloc principal et en sous blocs les cultures (légumineuses « pures », céréales « pures » et associations). Les planches constituent des blocs incomplets et le nombre de répétitions varie selon les modalités pour des questions pratiques (taille des parcelles, moyens matériels et humains disponibles). Les différents niveaux de fertilisation ont été séparés par des parcelles tampons. Le plan expérimental de cet essai est décrit en **Annexe I**.

Le précédent de culture était un sorgho (*Sorghum bicolor*) cultivé en sec. 7 t ha^{-1} de résidus ayant un rapport C:N de 63 ont été enfouis par labour le 26 septembre 2005 entre 20 et 25 cm. Le reliquat azoté moyen mesuré au semis sur 0-120 cm était de 37 kg N ha^{-1}. Le **Tableau 2** ci-dessous récapitule les différents traitements évalués en 2005-2006 et qui seront traités dans cette thèse. Les itinéraires techniques sont décrits dans l'**Annexe I**.

Trois niveaux de fertilisation ont été testés :

- **N0** : Pas de fertilisation azotée.
- **N100** : Faible niveau de fertilisation azotée (comparativement aux recommandations sur blé dur « pur ») réalisé en deux apports de 50 kg N ha^{-1} au stade épi 1cm du blé dur (E1cm, Zadoks 30 (Zadoks et al. 1974)) et au stade gonflement (Zadoks 37).
- **N180** : Fertilisation azotée modérée (comparativement aux recommandations sur blé dur « pur ») en trois apports : 30 kg N ha^{-1} au tallage du blé dur (Zadoks 23), 100 kg N ha^{-1} au stade E1cm et 50 kg N ha^{-1} au stade gonflement

Culture	Variétés	Structure du couvert	Densité semis (grains m^{-2})	Densité observée (plante m^{-2})	Répétitions			Total
					N0	N100	N180	
Blé pur	Nefer	BBBBBBBBBBB	336	226	4	5	5	14
		B B B B B B B	168	111	-	2	6	8
	Neodur	BBBBBBBBBBB	336	229	-	2	2	4
	Acalou	BBBBBBBBBBB	336	112	-	2	3	5
	L1823	B B B B B B B	168	102	2	3	-	5
Pois pur	Lucy	P P P P P P	72	51	6	-	-	6
			36	27	4	-	-	4
Féverole pure	Castel	F F F F F F	30	26	3	-	-	3
Association Blé / Pois	Nefer / Lucy	BPBPBPBPBPB	168 / 36	112 / 27	5	5	4	14
	Neodur / Lucy			114 / 26	2	2	-	4
	Acalou / Lucy			53 / 26	2	2	-	4
	L1823 / Lucy			103 / 27	3	3	-	6
Association Blé / Féverole	Nefer / Castel	BFB BFB BFB	168 / 15	112 / 13	3	3	-	6
Total					34	29	20	83

Tableau 2 *Description des traitements expérimentaux considérés en 2005-2006 : culture, variétés, structure du couvert (B : Blé dur, P : Pois d'hiver, F : Féverole d'hiver), densité de semis (grains m^{-2}), densité observée (plantes m^{-2} en moyenne pour tous les traitements azotés), identifiant et nombre de répétitions par traitement.*

II.3 Essai 2006-2007 : Comprendre les processus

Le dispositif expérimental est construit en split-split-plot avec les traitements azotés en bloc principal, les cultures (légumineuses « pures », céréales « pures » et associations) en sous-blocs et les variétés de blé dur en sous-sous-blocs. Les planches constituent des blocs complets et les différents niveaux de fertilisation sont séparés par des parcelles tampons. Le plan expérimental de cet essai est décrit en **Annexe II**.

Pour cet essai, le précédent était un tournesol (*Helianthus annuus*) non irrigué ayant reçu différents niveaux de fertilisation azotée : 50, 150, 0 et 100 kg N ha^{-1} correspondant respectivement aux quatre niveaux de fertilisation N0, N60, N80 et N140 décrits ci-dessous :

- **N0 :** Pas de fertilisation azotée.
- **N60 :** Un apport tardif de 60 kg N ha^{-1} au stade gonflement pour accroître la teneur en protéines du blé dur.
- **N80 :** Un apport précoce de 80 kg N ha^{-1} au stade E1cm pour accroître le potentiel de rendement.
- **N140 :** Un apport modéré correspondant à la combinaison des traitements N60 et N80.

Culture	Variétés	Structure du couvert	Densité semis (grains m^{-2})	Densité observée (plante m^{-2})	Répétitions				Total
					N0	N60+	N80	N140	
Blé pur	Nefer	BBBBBBBBBBB	336	203	4	3	3	3	13
		B B B B B B	168	101	4	3	3	3	13
	Neodur	BBBBBBBBBBB	336	186	4	3	3	3	13
		B B B B B B	168	92	4	3	3	3	13
	Acalou	BBBBBBBBBBB	336	170	4	3	3	3	13
		B B B B B B	168	84	4	3	3	3	13
	Orjaune	BBBBBBBBBBB	336	227	4	3	3	3	13
		B B B B B B	168	112	4	3	3	3	13
Pois pur	Lucy	PPPPPPPPPPP	72	56	5	-	-	-	5
		P P P P P P	36	28	5	-	-	-	5
Féverole pure	Castel	FFFFFFFFFFF	30	46	7	-	-	-	7
		F F F F F F	15	23	7	-	-	-	7
Association Blé / Pois	Nefer / Lucy	BPBPBPBPBPB	168 / 36	101 / 27	4	3	3	3	13
	Neodur / Lucy			93 / 27	4	3	3	3	13
	Acalou / Lucy			85 / 27	4	3	3	3	13
	Orjaune / Lucy			113 / 27	4	3	3	3	13
Association Blé / Féverole	Nefer / Castel	BFBFBFBFBFB	168 / 15	101 / 23	4	3	3	3	13
	Neodur / Castel			93 / 23	4	3	3	3	13
	Acalou / Castel			84 / 23	4	3	3	3	13
	Orjaune / Castel			112 / 23	4	3	3	3	13
Total					88	48	48	48	232

Tableau 3 *Description des traitements expérimentaux considérés en 2006-2007 : culture, variétés, structure du couvert (B : Blé dur, P : Pois d'hiver, F : Féverole d'hiver), densité de semis (grains m^{-2}), densité observée (plantes m^{-2} en moyenne pour tous les traitements azotés), identifiant et nombre de répétitions par traitement.*

Les résidus ont été incorporés le 25 septembre 2006 par labour (20-25 cm de profondeur). La quantité de résidus incorporée et leur rapport C:N ont été estimés à 5 t ha^{-1} (C:N 49), 7 t ha^{-1} (C:N 31), 4 t ha^{-1} (C:N 55) et 6 t ha^{-1} (C:N 40) pour N0, N60, N80 et N140 respectivement, ce qui suggère des dynamiques de minéralisation différentes. Par ailleurs, les reliquats azotés au semis mesurés sur 0-120 cm étaient de 30, 52, 28 et 46 kg N ha^{-1}

respectivement pour N0, N60, N80 et N140. Par conséquent, les différences de reliquat au semis combinées aux différences de minéralisation des résidus se sont certainement traduites par des dynamiques de disponibilité en azote contrastées. En particulier le traitement N60 ne doit pas être vu comme le simple effet d'une fertilisation tardive visant à accroître la teneur en protéines du blé dur et c'est pourquoi nous avons choisi de le nommer N60+. Le **Tableau 3** ci-dessus récapitule les différents traitements évalués en 2006-2007 et qui seront traités dans cette thèse. Les itinéraires techniques sont décrits dans l'**Annexe II**.

II.4 Essai 2007-2008 : Evaluation d'itinéraires techniques conçus à dire « d'experts »

L'objectif de l'essai était de tester des itinéraires techniques qui soient réalisables et cohérents pour quelques cas de systèmes de production et répondant à des objectifs scientifiques et agricoles avec comme objectif principal la production de blé dur de qualité en système à bas-intrants. Cet essai avait également pour objectif secondaire d'évaluer la performance des associations une année donnée vis-à-vis des maladies et ravageurs et plus généralement les intérêts agro-environnementaux de ces systèmes comparativement aux cultures monospécifiques afin de voir si cette piste pouvait être à privilégier dans les futures recherches. Le dispositif expérimental est construit en trois blocs correspondant chacun à une répétition. Au sein de chaque bloc, les conduites ont été regroupées en fonction de leur niveau de fertilisation (N75, N35 et N0) et des traitements insecticides, fongicides et herbicides (AB*, P0, P1, P2 et P3) en sous-blocs répartis de manière aléatoire et séparées par des parcelles tampons. Le plan expérimental de cet essai est décrit en **Annexe III**.

Le précédent de culture était un tournesol et le reliquat moyen mesuré au semis sur 0-120 cm était de 90 kg N ha^{-1} présentant une assez forte variabilité (écart type 24 kg N ha^{-1}). Les différents traitements évalués en 2007-2008 sont décrits dans le **Tableau 4** ci-dessous. Les objectifs détaillés et la méthode de conception des différents itinéraires techniques d'associations feront l'objet d'une présentation détaillée dans le **Chapitre V**. Les itinéraires techniques sont décrits dans l'**Annexe III**.

III. Mesures et traitement des données

Cette partie vise à présenter les principales mesures réalisées au cours de cette thèse et ceci de manière relativement succincte. Une description plus détaillée sera faite en explicitant les traitements comparés pour tester une hypothèse et les calculs réalisés dans les différentes parties lorsque cela s'avèrera nécessaire.

III.1 Prélèvements

Lors des trois campagnes d'essai, quatre prélèvements ont été réalisés au cours des cycles végétatifs aux stades épi 1cm du blé dur, au début de la floraison des légumineuses, à la floraison du blé dur et à la maturité physiologique des espèces. La récolte finale a été faite à la maturité des légumineuses dans le cas des cultures « pures » de pois d'hiver et de féverole d'hiver et à la maturité du blé dur pour la céréale « pure » et les associations.

Lors de chaque prélèvement les rangs extérieurs n'ont pas été prélevés pour s'affranchir des effets de bordure entre parcelles. Un espace de 0.5 m a été respecté entre deux prélèvements successifs dans le but d'éviter les effets de bordure dus aux prélèvements. A chaque mesure une surface de 0.5 m x 1.015 m (4 ou 7 rangs sur 0.5 m de longueur) a été prélevée en coupant les plantes juste au dessus du niveau du sol.

Culture	Variétés	Date semis	Structure du couvert	Identifiant	Densité semis (grains m^{-2})	Densité observée (plante m^{-2})	Fertilisation (kg N ha^{-1})	Traitement semences	Desherbage	Insecticide	Fongicide	Répétitions
Blé pur	Neodur	07/11/07	BBBBBBBBBBB	Nd-N75P2	336	230	40 + 35	Oui	Chimique	Non	x 2	3
				Nd-N35P1	336	216	35	Oui	Chimique	Non	Non	6
	Acalou	19/12/07	BBBBBBBBBBB	Ac-N75P2	336	207	40 + 35	Oui	Chimique	Non	x 2	3
				Ac-N35P1	336	244	35	Oui	Chimique	Non	Non	6
	L1823	07/11/07	BBBBBBBBBBB	L1823-N75P2	336	239	40 + 35	Oui	Chimique	Non	x 2	3
				L1823-N0AB*	420	125	0	Non	Herse Etrille x 2	Non	Non	6
Pois pur	Lucy	07/11/07	P P P P P P	P-N0P3	72	58	0	Oui	Chimique	x 1	x 1	6
				P-N0P1	72	59	0	Oui	Chimique	Non	Non	6
				P-N0AB*	90	75	0	Non	Herse Etrille x 2	Non	Non	6
Féverole pure	Castel	07/11/07	F F F F F F	F-N0P3	30	24	0	Oui	Chimique	x 1	x 1	6
				F-N0P1	30	24	0	Oui	Chimique	Non	Non	6
				F-N0AB*	37	25	0	Non	Herse Etrille x 2	Non	Non	6
Association Blé / Pois	Neodur / Lucy	07/11/07	Mélange sur le rang	ICPmix-NdN35P1	168 / 36	95 / 28	35	Oui	Chimique	Non	Non	3
			BPBPBPBPBPB	ICPlin-NdN35P1	168 / 36	109 / 30	35	Oui	Chimique	Non	Non	9
			PB**P**B**P**B**P**B**P**	ICPadd-NdN0P1	168 / 72	109 / 59	0	Oui	Chimique	Non	Non	9
	Acalou / Lucy	19/12/07	Mélange sur le rang	ICPmix-AcN35P1	168 / 36	85 / 9	35	Oui	Chimique	Non	Non	3
			BPBPBPBPBPB	ICPlin-AcN35P1	168 / 36	138 / 32	35	Oui	Chimique	Non	Non	9
Association Blé / Féverole	L1823 / Castel	07/11/07	BFB BFB BFB	ICFlin-L1823N0P1	168 / 15	119 / 12	0	Oui	Chimique	Non	Non	3
				ICFlin-L1823N0AB*	210 / 18	59 / 12	0	Non	Herse Etrille x2	Non	Non	9
Total												108

Tableau 4 *Description des traitements expérimentaux considérés en 2007-2008 : culture, variétés, date de semis, structure du couvert (B : Blé dur, P : Pois d'hiver, F : Féverole d'hiver), densité de semis (grains m^{-2}), densité observée (plantes m^{-2}), identifiant, fertilisation (kg N ha^{-1}), traitement de semence, désherbage (chimique ou mécanique), insecticide, fongicide et nombre de répétitions par traitement.*

III.2 Biomasse et acquisition de l'azote

A la maturité – après un passage à l'étuve à 80 °C pendant 48 h – la matière sèche totale, le nombre de grains, le poids des grains ont été déterminés sur un échantillon de 150 épis de blé dur, 20 plantes de pois d'hiver et 10 plantes de féverole d'hiver permettant le calcul de l'indice de récolte. La surface restante (sur laquelle n'ont pas été réalisés les prélèvements) a été récoltée mécaniquement pour déterminer le rendement total.

Les échantillons ont ensuite été broyées finement (Ø 0.5 mm) afin d'en déterminer la teneur en azote et en carbone par combustion sèche (méthode Dumas) en utilisant un auto-analyseur LECO CHN-2000 (Leco Corporation, St. Joseph, Etats-Unis). De plus des mesures de l'excès isotopique ^{15}N ont été faites – séparément sur les pailles et les grains – à l'aide d'un analyseur élémentaire (Euro-EA, Eurovector, Milan, Italy) couplé à un spectromètre de masse (Delta advantage, Thermo-Electron, Bremen, Germany) dans l'objectif d'estimer la fixation symbiotique des légumineuses.

Des prélèvements de sol (0-120 cm) ont été réalisés avant le semis, à la sortie de l'hiver et à la récolte à l'aide d'une tarière hydraulique de 15 mm de diamètre (MCL3, Geonor, Oslo, Norway) afin de quantifier l'azote minéral du sol (NH_4^+ et NO_3^-). Chaque échantillon correspond à 5 carottes prélevées dans le peuplement à coté des placettes à une distance de 1 m l'une de l'autre. Les carottes de sol ont été divisées en quatre horizons (0-30 cm, 30-60 cm et 60-90 cm et 90-120 cm). Chaque horizon a ensuite été homogénéisé en prenant soin d'extraire les cailloux et les débris de végétaux. Les échantillons ont ensuite été congelés avant leur extraction au KCl à 1 mol L^{-1} et leur analyse par colorimétrie (réactions de Griess et de Berthelot pour respectivement le nitrate et l'ammonium) à l'aide d'un analyseur à flux continu (Skalar 5100, Skalar Analytic, Erkelenz, Germany). La teneur en eau des échantillons a été quantifiée sur un échantillon de 150 g de sol à partir de pesées faites avant et après séchage en étuve à 105 °C pendant 72 heures.

III.3 Structure du couvert et acquisition de la lumière

Le nombre de plantes a été mesuré un mois après le semis sur quatre rangs de un mètre de longueur. Les densités observées sont présentées dans les **Tableaux 2, 3 et 4** pour les trois années successivement. Des mesures de la hauteur des couverts ont été faites à différentes dates selon les années. Lors des différents prélèvements (à l'exception de celui réalisé à maturité physiologique) un sous échantillon de 5 à 10 plantes de blé dur et 5 de légumineuses ont été séparées entre feuilles vertes, tiges et parties sénescentes. Sur les sous-échantillons de pois d'hiver les vrilles foliaires ont été séparées des stipules. Les parties sénescentes des feuilles ont été coupées et ajoutées au reste du matériel sénescent et la surface foliaire des parties vertes a été déterminée à l'aide d'un planimètre LI-3100 (LI-COR Inc., Lincoln, Etats-Unis). Les échantillons et sous-échantillons ont été séchés à 80 °C pendant 48 heures avant d'en déterminer la matière sèche. La surface foliaire et le LAI (Leaf Area Index) de l'ensemble de la placette ont ensuite été estimés en considérant la masse surfacique du sous-échantillon planimètré.

Le rayonnement photosynthétiquement actif (PAR correspondant à la longueur d'onde 400-700 nm) absorbé par les couverts a été mesuré à l'aide d'un ceptomètre linéaire PAR-80 (Decagon Devices Inc, Washington, Etats-Unis) en 2005-2006 et 2006-2007 et à l'aide de capteurs PAR en ligne de 30cm (PAR/LE, Solems SA, Palaiseau, France) laissés à demeure en 2006-2007 et 2007-2008 et connectés à une centrale d'acquisition (ENC 10/12, Campbell Scientific Ltd, Logan, Etats-Unis).

III.4 Evaluation de la pression des facteurs biotiques

Des notations semi-quantitatives ont été réalisées pour évaluer la pression des maladies sur blé dur (principalement les septorioses *Septoria tritici* et *Septoria nodorum*) et sur légumineuses (principalement l'anthracnose *Mycosphaerella pinodes*) ; les mesures ont été effectuées en 2007-2008 toutes les deux semaines à partir de début avril jusqu'à la récolte.

Une estimation des dégâts occasionnés par les larves de sitones sur les nodosités a été réalisée fin avril 2008 sur trois plantes par traitement à partir d'une méthode semi-quantitative consistant à prélever les racines de légumineuses et à estimer le pourcentage de nodosités percées. Les larves présentes dans les nodosités ont également été comptées. Par ailleurs une quantification de la population de jeunes adultes a été réalisée au printemps 2008 à l'aide de pièges à émergence.

Des estimations de la population des pucerons verts du pois d'hiver (*Acyrthosiphon pisum* Harry) et des pucerons de la féverole d'hiver (*Aphis fabae* Scopoli et *Megoura viciae* Buckton) ont été réalisées en 2008 à partir du début de la floraison des protéagineux à partir de l'échantillonnage de 10 tiges secouées au dessus d'un bac plastique afin de recueillir les pucerons.

Une identification botanique non destructive des principales adventices a été réalisée au champ le 20 mai 2008 afin de déterminer les espèces dominantes dans chaque parcelle de l'essai. Parallèlement un prélèvement a été réalisé le même jour sur une placette d'environ 1 m² pour déterminer la biomasse totale de mauvaises herbes et à la récolte un second prélèvement a été effectué sur l'ensemble des microparcelles de la parcelle.

Les protocoles utilisés pour évaluer la pression des facteurs biotiques sont décrits en détails dans le **Chapitre V**.

IV. Conditions pédo-climatiques et déroulement des cycles culturaux

Les expérimentations ont été réalisées en 2005-2006 et 2006-2007 sur la station expérimentale de l'INRA de Toulouse–Auzeville et en 2007-2008 sur le domaine du lycée agricole d'Auzeville (Latitude 43°31' N, Longitude 1°29' E, Altitude 150 m).

IV.1 Conditions climatiques

La moyenne annuelle des précipitations sur le site d'Auzeville enregistrée au cours des 25 dernières années est de 656 mm pour une température journalière moyenne de 13.7 °C avec un maximum en août (21.9 °C) et un minimum en janvier (6.1 °C). La somme des précipitations enregistrée au cours des expérimentations était de 361mm, 468 mm et 436 mm pour les trois années successives. Pour la même période (novembre–juillet), les précipitations cumulées enregistrées en moyenne au cours des 25 dernières années étaient de 498 mm. Les enregistrements climatiques (température, précipitations et rayonnement global) sont présentés sur la **Figure 2** pour chaque année séparément.

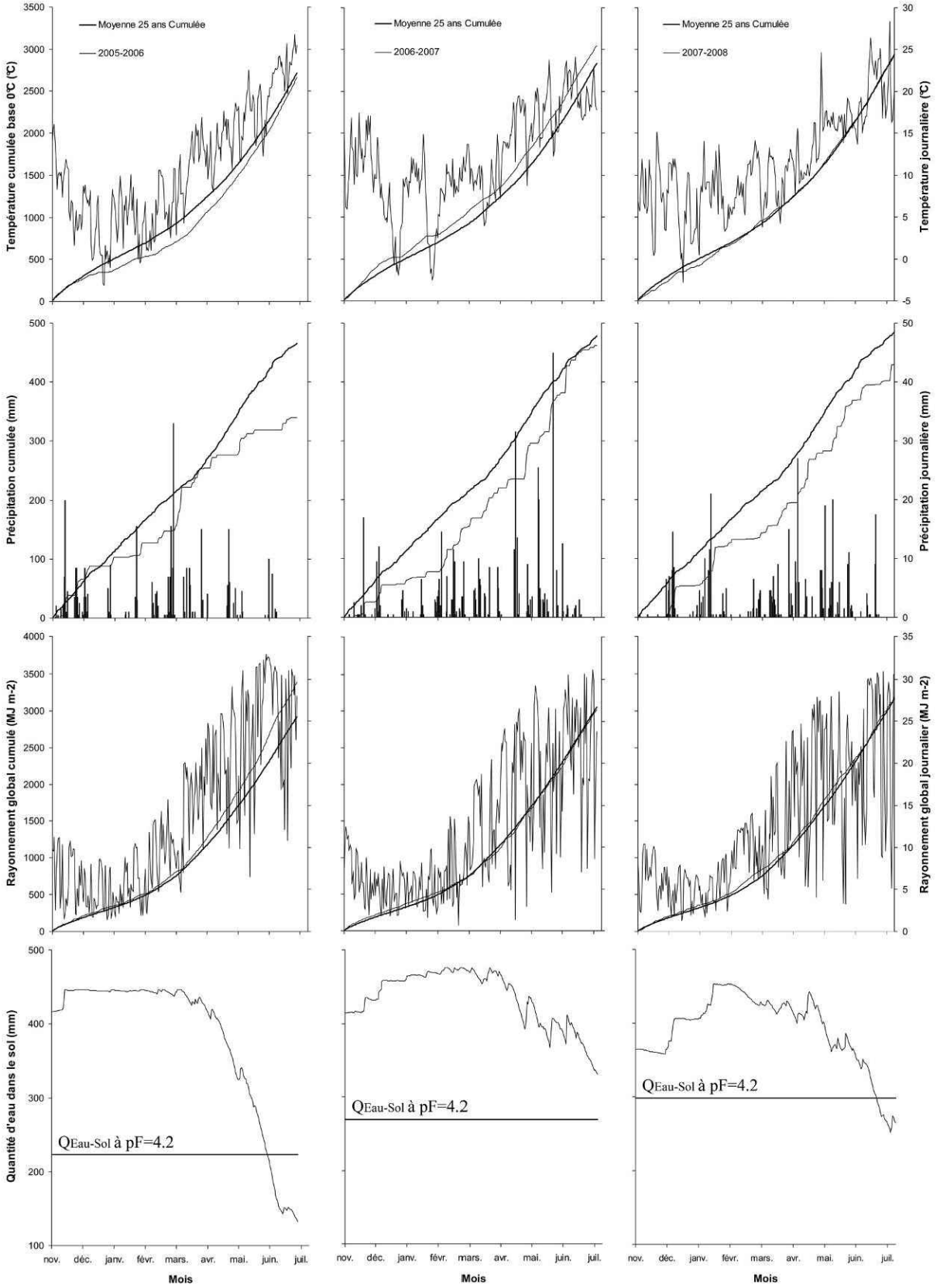


Figure 2 *Données journalières et cumulées de température, précipitation et rayonnement global enregistrées sur la station expérimentale de l'INRA de Toulouse-Auzeville (Latitude 43°31' N, Longitude 1°29' E, Altitude 150 m) ainsi que la quantité d'eau dans le sol calculée à partir du bilan hydrique du 1er novembre à la récolte du blé dur pour 2005-2006, 2006-2007 et 2007-2008 et pour la période 1984-2008.*

En 2005-2006, comparativement à la moyenne des 25 dernières années l'hiver a été plus froid et plus sec et le printemps plus chaud et plus sec. En 2006-2007, a contrario, l'hiver a été plus chaud et plus sec que la moyenne et le printemps particulièrement humide. Enfin, en 2007-2008 les températures ont été conformes à la moyenne tout au long de l'année, il en est de même pour les précipitations au printemps alors qu'en hiver ces dernières ont été inférieures à la moyenne. D'un point de vue du rayonnement global, nous n'avons pas observé de différence en 2006-2007 et 2007-2008 comparativement à la moyenne alors qu'en 2005-2006 l'ensoleillement a été supérieur tout au long du printemps.

La quantité d'eau dans le sol ($Q_{Eau\text{-}Sol}$), exprimée en millimètres, a été calculée sur 0-150 cm à partir d'un bilan hydrique simplifié en considérant que $Q_{Eau\text{-}Sol}$ ne peut être inférieure à 0 ni supérieure à celle à la capacité au champ (estimée par des mesures de sol en sortie d'hiver) :

$$Q_{Eau\text{-}Sol} = Q_{Eau\text{-}Sol\ Semis} + \sum_{i=1}^{n} \left(P_i - Kc_i \times ETPp_i + I_i + RC_i \right)$$

avec $Q_{Eau\text{-}Sol\ Semis}$ la quantité d'eau dans le sol au semis (mm) sur 0-150 cm et pour un jour 'i' : Pi le volume de précipitation (mm), Kc_i le coefficient cultural du blé dur, $ETPp_i$ l'évapotranspiration selon Penman-Monteith (mm), I_i la quantité d'eau apportée par irrigation (mm) et RC_i la quantité d'eau provenant de remontées capillaires. Le coefficient cultural journalier du blé dur (Kc_i) a été calculé en considérant une valeur de 0.4 à la levée du blé dur, de 1 au stade épi 1cm, de 1.1 à la floraison du blé dur et de 0.7 à la maturité du blé dur et une évolution linéaire entre deux stades successifs. Un apport d'eau d'irrigation a été réalisé en 2006-2007 seulement (20 mm au semis). Enfin, les remontées capillaires ont été estimées comme nulles en 2006-2007 et 2007-2008. Par contre, en 2005-2006 nous avons estimé qu'elles représentaient 2 mm par jour lorsque la quantité d'eau dans le sol était inférieure à 75% de la quantité d'eau au point de flétrissement (pF=4.2). La quantité d'eau dans le sol à pF=4.2 a été mesurée sur des échantillons de sol pour chaque année. La **Figure 2** représente l'évolution de la quantité d'eau dans le sol calculée à partir du bilan hydrique ainsi que la quantité d'eau dans le sol à pF=4.2.

On observe que la quantité d'eau à pF=4.2 était de 223 mm en 2005-2006, 269 mm en 2006-2007 et 298 mm en 2007-2008 pour des humidités à la capacité au champ de 447 mm, 476 mm et 453 mm respectivement. Ces graphiques indiquent que la quantité d'eau disponible était moindre en 2007-2008 comparativement aux deux autres années. Par ailleurs, on observe en fin de cycle en 2005-2006 et 2007-2008 que la quantité d'eau dans le sol simulée était inférieure à la quantité d'eau à pF=4.2 indiquant de possibles stress hydriques en fin de cycle.

IV.2 Conditions pédologiques

Les caractéristiques granulométriques, de pH et de teneur en carbonate de calcium ($CaCO_3$) des sols pour chaque expérimentation sont décrites dans le **Tableau 5**.

La première expérimentation a été réalisée sur un sol limoneux de pH 8.0 présentant une teneur en $CaCO_3$ importante dans l'horizon 90-120 (64.8 g kg^{-1}). L'horizon supérieur (0-30 cm) contenait 9.4 g kg^{-1} de carbone total, 0.93 à 1.09 g kg^{-1} d'azote total, une CEC de 16.0 cmol+ kg^{-1} et une teneur en phosphore (P-Olsen) et potassium satisfaisante (0.09 g kg^{-1} et 0.26 g kg^{-1} respectivement).

Le second essai a été implanté sur un sol de type argilo-limoneux de pH 8.3 principalement du à une teneur en $CaCO_3$ très élevée dans l'horizon 60-120 cm (164.9 g kg^{-1}). L'horizon supérieur (0-30 cm) contenait 9.9 g kg^{-1} de carbone total, 1.07 g kg^{-1} d'azote total, une CEC de 21.7 cmol+ kg^{-1} et des niveaux corrects de phosphore (P-Olsen) et de potassium (0.05 g kg^{-1} et 0.16 g kg^{-1}).

En 2007-2008, le sol était de type limono-argileux de pH 8.2. L'horizon supérieur (0-30 cm) contenait 8.4 g kg^{-1} de carbone total, 1.02 g kg^{-1} d'azote total, une CEC de 19.3 cmol+ kg^{-1} et une teneur en phosphore (P-Olsen) et potassium moindre (0.02 g kg^{-1} et 0.08 g kg^{-1} respectivement).

Année	Profondeur	Argile $g.kg^{-1}$	Limon $g.kg^{-1}$	Sable $g.kg^{-1}$	pH	$CaCO_3$ $g.kg^{-1}$
2005-2006 (Expérimentation I)	0-30 cm	213	295	489	7.5	2.7
	30-60 cm	216	304	478	7.7	1.8
	60-90 cm	220	276	492	8.3	12.5
	90-120 cm	286	275	373	8.4	64.8
2006-2007 (Expérimentation II)	0-30 cm	284	322	329	8.1	7.5
	30-60 cm	299	333	322	8.1	10.0
	60-90 cm	254	348	265	8.5	131.0
	90-120 cm	218	369	208	8.6	198.8
2007-2008 (Expérimentation III)	0-30 cm	372	348	274	7.7	6.0
	30-60 cm	309	460	208	8.0	23.0
	60-90 cm	363	456	127	8.4	54.0
	90-120 cm	331	506	99	8.5	64.0

Tableau 5 *Analyse granulométrique, pH et teneur en $CaCO_3$ par horizon mesurés sur des échantillons de sols prélevés lors des trois années d'expérimentation (2005-2006, 2006-2007 et 2007-2008).*

IV.3 Observations des stades de développement

On observe (**Figure 3**) que la durée du cycle du blé dur et de la féverole d'hiver ont été similaires en termes de jours calendaires au cours des trois années alors que des différences significatives ont été observées en degrés jours (2580, 2980 et 2896 °C j^{-1} pour les trois années successives), ce qui s'explique par l'effet prépondérant du photopériodisme pour le déroulement de certains stades de développement. Dans le cas des cultures « pures » de pois d'hiver on remarquera que la maturité physiologique a été plus précoce en 2006-2007 puisqu'elle a été observée le 6 juin alors qu'elle a au lieu les 13 et 19 juin en 2005-2006 et 2007-2008 respectivement. La levée des différentes cultures a été plus rapide en 2006-2007 en raison des températures plus élevées et de l'apport de 20 mm d'irrigation et à l'inverse plus lente en 2005-2006 en particulier pour les légumineuses. On notera l'apparition précoce du stade épi 1 cm du blé dur en 2006-2007 autour du 20 février à environ 870 °C j^{-1} ce qui s'explique par un hiver relativement doux alors que ce même stade a eu lieu le 29 mars en 2005-2006 (878 °C j^{-1}) et le 15 mars en 2007-2008 (991 °C j^{-1}). Enfin, la floraison du blé dur a eu lieu pour les trois années autour du 15 mai mais à des sommes de températures différentes (1552, 1902 et 1780 °C j^{-1} pour les trois expérimentations successives). Notons que les stades de développement du blé dur et des légumineuses n'ont pas été modifiés dans les cultures associées comparativement aux cultures « pures ».

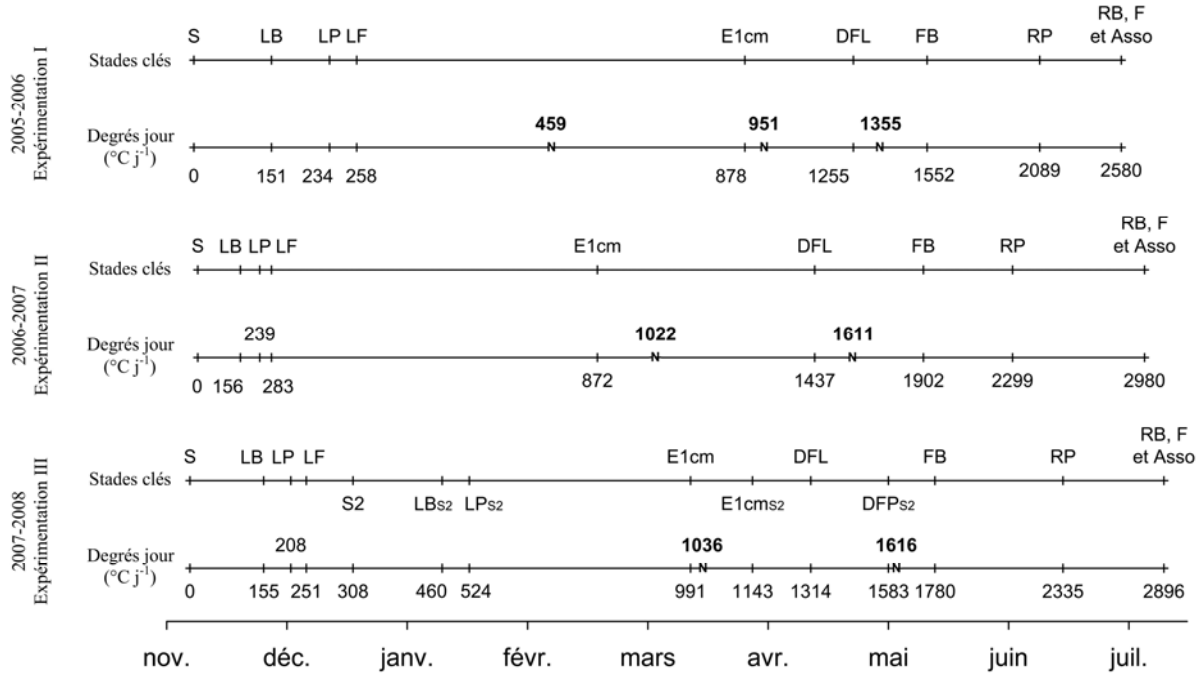


Figure 3 *Stades clés et apports d'azote (N) lors des trois années d'expérimentation (2005-2006, 2006-2007 et 2007-2008) représentés sur une échelle calendaire couplée à une échelle de temps thermique (base 0 °C) : semis (S), semis décalé (S2), levée blé dur (LB), levée pois d'hiver (LP), levée féverole d'hiver (LF), stade épi 1cm du blé dur (E1cm, Zadoks 30), début floraison légumineuse (DFL), floraison blé dur (FB, Zadoks 69), récolte du pois d'hiver à maturité physiologique (RP) et récolte du blé dur (RB), de la féverole d'hiver (F) et des associations (Asso) à maturité physiologique du blé dur.*

V. Quels sont les indicateurs les plus pertinents pour étudier les interactions entre espèces dans l'association blé dur – pois d'hiver ?

Which are the most suitable indices to analyse species interactions in a durum wheat – winter pea intercrop?

Article en cours de soumission à European Journal of Agronomy.

Résumé

Il existe de nombreux indicateurs permettant d'évaluer la performance des associations et de comparer les interactions inter- et intraspécifiques. A partir de l'analyse du rendement, de l'azote accumulé et de la dynamique de production de biomasse dans une association de blé dur (*Triticum turgidum* L., cv. Nefer) et de pois d'hiver (winter pea, *Pisum sativum* L., cv. Lucy) nous avons comparé différents indicateurs pour tenter d'identifier les mieux adaptés. Le land equivalent ratio (LER) est certainement l'indicateur le plus communément utilisé mais souvent uniquement pour conclure que les associations sont ou non plus performantes que les cultures « pures ». Pourtant cet indicateur, et en particulier lorsque l'on représente le LER partiel du blé dur en fonction de celui du pois d'hiver, permet de mettre en évidence des processus d'interaction mutuelle ou à l'inverse de facilitation. Par ailleurs, on retrouve parfois dans la littérature des indicateurs dont le sens n'est pas clairement défini ou pour lesquels l'interprétation est erronée. Ceci est le cas notamment de l'agressivité qui, contrairement à ce que de nombreux auteurs affirment, ne permet pas de conclure qu'une espèce est dominante ou dominée. C'est pourquoi nous lui préférons le changement en contribution qui compare la proportion du blé dur dans l'association par rapport à sa proportion dans les cultures « pures ». Pour autant, ces différents indicateurs ne permettent pas d'analyser séparément les compétitions inter- et intraspécifiques ni les processus en dynamique. Nous proposons donc de représenter l'indice de compétition interspécifique en fonction de l'indice de compétition intraspécifique et ceci à différents stades clés, ce qui permet : i) d'analyser les compétitions inter- et intraspécifiques séparément, ii) d'évaluer les interactions en dynamique, iii) d'identifier d'éventuels processus de facilitation, iv) de déterminer à quel moment les compétitions se mettent en place et donc les stades clés de leur occurrence et v) d'expliquer les conséquences sur l'élaboration du rendement.

V.1 Introduction

Adapted from original manuscript

There are many indices of interaction used in the literature to evaluate the potential advantage of intercrops and to compare intraspecific and interspecific interactions. Various indices of intercropping have been reviewed by several authors (Willey and Rao 1980; De Wit 1960; Mead and Riley 1981; Williams and Mc Carthy 2001) for both replacement and additive designs, sometimes taking into account crop density, which is known to affect plant yields. The choice of such indices, their use and significance is crucial to make correct interpretations. The land equivalent ratio (LER) – an index well known to agronomists – is widely used to compare the efficiency of sole crops and intercrops for yield or dry weight production. Nevertheless the LER index has rarely been explored for all its potentialities: it is normally simply used to compare LER values with one, i.e. by investigating whether or not the intercrop is producing more than the sole crops. However, as pointed out by Williams and Mc Carthy (2001) this index could be much more useful because it allows to distinguish: i) a species' competitive advantage from the other ii) mutual interference and iii) facilitation interaction. Moreover, we can sometimes find in the literature the use of indices which are somewhat unclear or given an erroneous meaning. For example, aggressivity or the plant aggressivity – defined as the difference between partial LER values – have often been used to conclude that a crop is dominant or dominated but without giving a clear definition of these terms and without considering that crop dominance can change over time. Another example could be when comparing the relative performance of crops for biomass production in dynamics: the use of the relative efficiency index could be proposed without referring to the absolute dry weight of the crops since this index is by definition relative.

The value of these indices is thus questionable due to difficulty in their interpretation. The aim of our study was to compare the most commonly used indices with others rarely used despite being easily understood and potentially relevant such as: i) the change in contribution used to compare the proportion of a species in a mixture with that in sole crops (Williams and Mc Carthy 2001), ii) the interspecific and intraspecific interaction indices allowing evaluation of these interactions separately and iii) the comparative absolute growth rate as an alternative to the relative efficiency index to compare species growth. Focusing on the dynamics of dry weight production, shoot N accumulated and final grain yield, and considering various N availabilities modified by fertilization (quantity and splitting of doses) this paper will compare the various indices to evaluate crop competitiveness and durum wheat – winter pea intercrop advantages compared to sole crops and finally will attempt to identify the most suitable indices.

V.2 Materials and methods

Adapted from original manuscript

V.2.1. Site and Soil

The experiment was carried out on the two experimental fields of the Institut National de la Recherche Agronomique station in Auzeville (SW France, 43°31'N, 1°30'E) in 2005-2006 (Exp. I) and 2006-2007 (Exp. II) see **Chapter II, Part IV** for details.

V.2.2. Experimental design

Durum wheat (W) (*Triticum turgidum* L, cv. Nefer – authority Eurodur) and winter pea (P) (*Pisum sativum* L., cv. Lucy – authority Serasem) were grown as sole crops (SC),

half density sole crops (SC1/2) and mixed crops (IC) in a row substitutive design see **Chapter II, Part II** for details.

In both experiments, different fertilizer N sub-treatments in quantity and splitting of doses (**Table 6**) were evaluated on wheat sole crops, wheat half density sole crops and intercrops while pea sole crops and pea half density sole crops were grown only without any N application see **Chapter II, Part II** for details. The two experiments (I and II), combined with various N treatments, aimed to cover a wide range of N availability (**Table 6**; see **Chapter III, Part I** for details) which can be considered as low N input systems for durum wheat, a very N demanding crop (up to 300 kg N ha^{-1} for a 8 t ha^{-1} grain target).

The experimental layout for both experiments was a randomized split-plot design with N application as main plots and crops as subplots see **Chapter II, Part II** for details. Not all combinations of N fertilization and crops were evaluated. The number of replicates for each treatment varied from two to six (**Table 6**).

Year (Experiment)	N	Stages and amount of fertilizer-N			Previous crop and amount of fertilizer-N	Initial mineral N (kg N ha^{-1})	Estimated mineral N available (kg N ha^{-1})	Number of replicates				
		Zadoks 23 Wheat Tillering	Zadoks 30 'Ear 1cm' of wheat	Zadoks 37 Flag leaf visible				SC		SC1/2		IC
								Pea	Wheat	Pea	Wheat	
2005-2006 (Experiment I)	N0		No fertilizer-N		*Sorghum bicolor* 100 kg N ha^{-1}	37	90	4	4	4	-	5
	N100	-	50 kg N ha^{-1}	50 kg N ha^{-1}	*Sorghum bicolor* 100 kg N ha^{-1}	37	168	-	5	-	2	5
	N180	30 kg N ha^{-1}	100 kg N ha^{-1}	50 kg N ha^{-1}	*Sorghum bicolor* 100 kg N ha^{-1}	37	223	-	5	-	6	4
2006-2007 (Experiment II)	N0		No fertilizer-N		*Helianthus annuus* 50 kg N ha^{-1}	30	94	5	4	5	4	4
	N60+	-	-	60 kg N ha^{-1}	*Helianthus annuus* 150 kg N ha^{-1}	52	144	-	3	-	3	3
	N80	-	80 kg N ha^{-1}	-	*Helianthus annuus* *No fertilizer-N*	28	150	-	3	-	3	3
	N140	-	80 kg N ha^{-1}	60 kg N ha^{-1}	*Helianthus annuus* 100 kg N ha^{-1}	46	171	-	3	-	3	3

Table 6 *Description of the different N treatments for experiments I and II: i) stages (Zadoks scale) and amount of fertilizer-N, ii) previous crop and amount of fertilizer-N, iii) initial mineral N (0-120 cm depth), iv) estimated available mineral N and v) number of replicates for the sole crops (SC), the half density sole crops (SC1/2) and the intercrops (IC).*

The simplest layout to study mixed crops is the cultivation of components in alternate rows (see **Figure 1** in **Chapter I, Part III**). In this case, variations between simple and double spaced rows pure crops of species A (a) allow the study of intraspecific interactions, i.e. the effect of the presence of species A on A. In additive experiments, the density of species A is the same in the mixture and in the pure stand (b). Such design is well suited for the study of interspecific interactions, i.e. the effect of the presence of species B on A and vice versa. In substitutive design (c), the comparison of simple spaced rows of pure crops with a mixed crop (c) considers the balance between intra- and interspecific interactions. Such a layout results in substitution of part of the intraspecific interactions by interspecific interactions, and therefore they cannot be analyzed separately.

V.2.3. Measurements and analysis

Four samplings were carried out during the growing season at key development stages: i) stage ‘1cm ear’ of wheat (Zadoks 30), ii) beginning of pea flowering (Zadoks 37 of wheat), iii) wheat flowering (Zadoks 69) and iv) pea physiological maturity for sole cropped pea or wheat physiological maturity for the intercrops and wheat sole crops see **Chapter II, Part III** for details.

V.2.4. Definition and calculation of indices

V.2.4.1. Yield Land Equivalent Ratio

The yield land equivalent ratio (LER_Y) is defined as the relative land area required when growing sole crops to produce the yield achieved in an intercrop (Willey 1979a). Yield LER for a wheat – pea intercrop is the sum of the partial LER values for wheat ($LER_{Y\text{-}W}$) and pea ($LER_{Y\text{-}P}$), in accordance with De Wit and Van Den Bergh (1965):

$$LER_{Y-W} = \frac{Y_{W-IC}}{Y_{W-SC}}$$

$$LER_{Y-P} = \frac{Y_{P-IC}}{Y_{P-SC}}$$

$$LER_Y = LER_{Y-W} + LER_{Y-P}$$

where $Y_{W\text{-}IC}$ and $Y_{P\text{-}IC}$ are the intercrop yield per unit area for wheat and pea respectively; $Y_{W\text{-}SC}$ and $Y_{P\text{-}SC}$ the yield per unit area achieved in sole crops for wheat and pea respectively. LER_Y was calculated separately for each intercrop replicate using the replicate values of yield for the numerators and the mean sole crops values across all replicates for the denominators to eliminate the variation in the ratio attributed to sole crop yield variability. Moreover, for $LER_{Y\text{-}W}$ we considered the same N treatment for intercrops and sole crops while $LER_{Y\text{-}P}$ was calculated with the unfertilized pea sole crop as reference because we assumed that N is not a limiting resource for legumes which did not affect pea yield.

To illustrate the pattern of competitive outcomes in intercrop experiments, Williams and McCarthy (2001) suggest plotting partial LER_Y of a species as a function of the partial LER_Y of the other. We propose to illustrate the distinction of areas of interest in **Figure 4**. The first main division is at the line where $LER_{Y-W} = LER_{Y-P}$. Values above this line (a) correspond to situations in which pea has a competitive advantage over wheat for grain yield production: the reverse is true below the line (b). The second main division is at the line where $LER_{Y-W} + LER_{Y-P} = 1$. Values above this line (d) indicate an overall advantage of the mixture over the two sole crops for grain yield production, indicating a better use of environmental resources (light, carbon, water and N) and vice versa when below the line (c). Furthermore, areas corresponding to partial LER values below 0.5 for pea (f) and for wheat (g) indicate that the species grain yield (per plant or row) is declining in the mixture compared to the sole crops because each species was sown in the intercrop at half of its sole crop density. Conversely, areas corresponding to values above 0.5 for pea (e) and for wheat (h) correspond to a situation where a species' grain yield (per plant or row) is increasing when intercropped. Thus, we can distinguish 4 other sub-areas: (k) an area of mutual interference when both intercropped species' grain yields (per plant or row) are declining, (j) an area of facilitation when the two species' grain yields (per plant or row) are increasing in the mixture, (i) an area where pea grain yield (per plant or row) is increasing and that of wheat is declining (per plant or row) and (l) an area where wheat grain yield is increasing (per plant or row) and that of pea is declining (per plant or row). The neutral point (n) at $LER_{Y-W} = LER_{Y-P} = 0.5$ indicates that the two species' plant grain yields (per plant or row) are similar in mixtures and in sole crops.

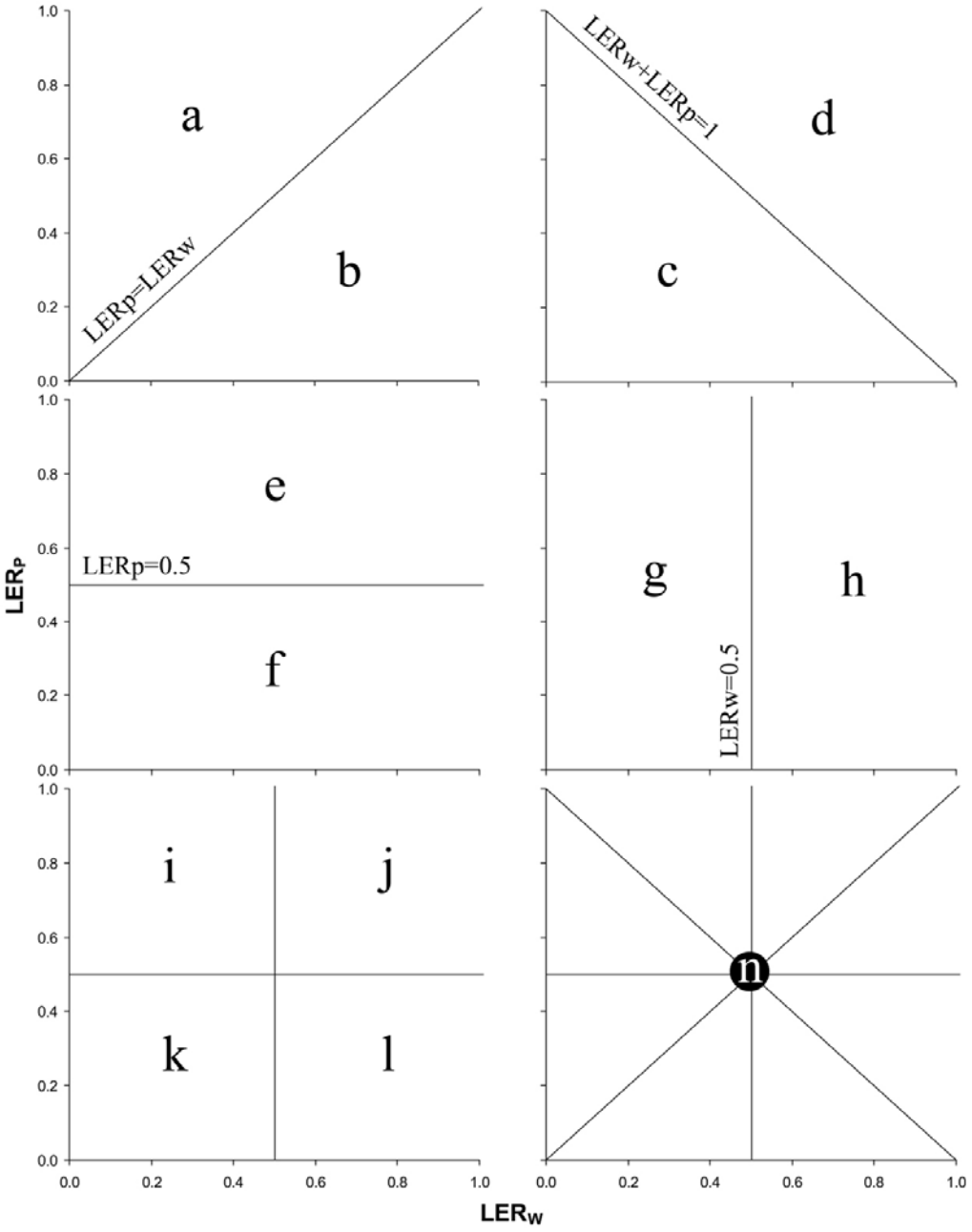


Figure 4 *Graphical representation of all possible outcomes of an interaction experiment with two species. The diagonal line corresponding to* $LER_{Y-W} = LER_{Y-P}$ *separates the areas of the graph in which winter pea has a competitive advantage over durum wheat (W) for grain yield production (a) and vice versa (b). The other diagonal corresponding to* $LER_Y = LER_{Y-W} + LER_{Y-P} = 1$ *separates the areas of the graph where sole crops are more efficient than the intercrop (IC) for grain yield production (c) and vice versa (d). Areas corresponding to partial LER values below 0.5 for pea (f) and for wheat (g) indicate that species grain yield (per plant or row) is less in the mixture than in the sole crop because each species was sown in the intercrop at half of its sole crop density. Conversely, areas corresponding to values above 0.5 for pea (e) and for wheat (h) represent situations where species grain yield (per plant or row) is higher when intercropped. Area (i) corresponds to situations in which pea suppresses wheat; the reverse is true in area (l). Finally, in area (k) both species are suppressed in the mixture due to competition while in area (j) both species grow better in the mixture (per plant or row) than they did as sole crops, indicating so-called "facilitation". The neutral point (n) at* $LER_{Y-W} = LER_{Y-P} = 0.5$ *indicates situations in which the two species' grain yield (per plant or row) are similar in the mixture and in sole crops.*

V.2.4.2. Yield Aggressivity

Yield aggressivity (AG_Y), defined as the difference between wheat and pea partial LER_Y values, is often used to evaluate how aggressively a species behaves in mixture. More precisely, AG_Y quantifies how much the relative yield of a species is greater than that of the other species. AG_Y is calculated for each species according to the formula proposed by Snyder et al. (1994) that we simplified as follows (see **Annexe IV: Appendix I** for details):

$$AG_{Y\text{-}W} = 2 \times (LER_{Y-W} - LER_{Y-P}) = -AG_P$$

Because $AG_{Y-W} = -AG_{Y-P}$, only one value needs to be calculated. Later on we will consider wheat aggressivity only and call it AG_Y. If $AG_Y = 0$, crops are equally competitive, if AG_Y is positive then wheat is the dominant crop and if AG_Y is negative then wheat is the dominated crop. This calculation allows comparison of species aggressivity on an area basis, which comes down to comparing aggressivity of the whole wheat population compared to that of pea. Indeed, in our situation both species occupied the same area in the intercrop due to the regular alternation of wheat and pea rows in the mixture. By analogy, we calculated the aggressivity by considering the N accumulated in shoots and called it AG_N.

V.2.4.3. Yield Plant Aggressivity

In our experiment, because of the big difference between wheat and pea sowing densities in the mixture, we also calculated the aggressivity for yield, assuming species sowing densities in the mixture ($SPlantAG_Y$ for Sowing Plant AGgressivity). $SPlantAG_Y$ is calculated for each species according to Snyder et al.'s (1994) equations that we simplified as follows (see **Annexe IV: Appendix II** for details):

$$SPlantAG_{Y-W} = 2 \times \left(\frac{LER_{Y-W}}{R_{W-IC}} - \frac{LER_{Y-P}}{R_{P-IC}}\right) = -SPlantAG_{Y-P}$$

where $R_{W\text{-}IC}$ and $R_{P\text{-}IC}$ are the sowing proportions (based on seed numbers) in intercrops of wheat and pea respectively. Since for AG_Y, $SPlantAG_{Y-W} = -SPlantAG_{Y-P}$, only one value needs to be calculated. Later on we will focus on wheat plant aggressivity only, naming it $SPlantAG_Y$. The meaning of $SPlantAG_Y$ is similar to that of AG except that $SPlantAG_Y$ compares species efficiency in mixtures on a seeds sown basis instead of an area basis. By analogy, we calculated the plant aggressivity by considering the N accumulated in shoots and called it $SPlantAG_N$. Because plant densities can be very different from sowing densities we also calculated plant aggressivity assuming the actual plant densities instead of the sowing plant densities (APlantAG for Actual Plant AGgressivity). APlantAG compares species efficiency in mixtures on a plant basis for yield ($APlantAG_Y$) and for N accumulated in shoots ($APlantAG_N$).

V.2.4.4. Change in contribution for Yield

Williams and McCarthy (2001) proposed an index called "change in contribution for yield" (CC_Y) that is calculated for each species separately. CC_Y is the proportion of grain yield of a species attained in mixture divided by the expected grain yield proportion from sole crops data by taking into account plant densities. Subtracting 1.0 from this value will give the proportional change in contribution of grain yield in a mixture compared to sole crops. This index may be useful to describe the changes in grain yield of species in different competitive situations. CC_Y is calculated for each species according to the formula proposed by Williams and McCarthy (2001) that we simplified as follows (see **Annexe IV: Appendix III** for details):

$$CC_{Y-W} = \frac{\frac{Y_{W-IC}}{Y_{IC}}}{\frac{Y_{W-SC}}{Y_{W-SC} + Y_{P-SC}}} - 1$$

where Y_{IC} is the whole intercrop grain yield per unit area so that: $Y_{IC} = Y_{W-IC} + Y_{P-IC}$. By analogy, it would be possible to calculate pea change in contribution (CC_{Y-P}). However, $CC_{Y-P} = (CC_{Y-W} + 1) \times \frac{LER_{Y-P}}{LER_{Y-W}} - 1$ (see **Annexe IV: Appendix IV** for mathematical proof) so below we will consider only wheat's change in contribution, naming it CC_Y. The index CC_Y was calculated using the replicate values of Y_{W-IC} and Y_{P-IC} and the mean sole crop values across all replicates for Y_{W-SC} and Y_{P-SC} to eliminate the variation in the ratio attributed to sole crop grain yield variability. Moreover, we used the same N treatment for Y_{W-SC} and Y_{IC} while Y_{P-SC} was always the unfertilized pea sole crop grain yield because we assumed that N is not a limiting resource for legumes and did not affect pea grain yield. CC_Y represents the change in proportion of grain yield contributed by each species in the mixture. If $CC_Y = 0$, then the grain yield proportion of wheat in the mixture is identical to that of the sole cropped wheat relative to the sum of the sole crops. If $CC_Y > 0 \Leftrightarrow LER_{Y-W} > LER_{Y-P}$ (see **Annexe IV: Appendix V** for mathematical proof), then the grain yield proportion of wheat in the mixture is greater than wheat grain yield proportion in the sole crops and vice versa if $CC_Y < 0$. By analogy, we calculated the change in contribution by considering the accumulated N in shoots and named it CC_N.

V.2.4.5. Interspecific interaction yield index

The effect of pea on wheat yield (interspecific interactions) was evaluated by calculating the wheat interspecific interaction yield index (IE_Y) according to Jacquard (1968):

$$IE_Y = \frac{Y_{W-IC}}{Y_{W-SC1/2}}$$

where $Y_{W-SC1/2}$ is the wheat half density sole crop yield per unit area. IE_Y was calculated for each intercrop replicate using the replicate values of Y_{W-IC} and the mean half density sole crop yield values across all replicates for $Y_{W-SC1/2}$ to eliminate the variation in the ratio attributed to half density sole crop yield variability. When $IE_Y = 1$ interspecific competition is nil, i.e. an intercrop pea row (at a sowing density of 36 seeds.m^{-2} in our experiment) did not affect the intercrop wheat row yield (at a sowing density of 168 seeds.m^{-2} in our experiment). When $IE_Y < 1$ intercrop wheat row yield is reduced by interspecific competition. On the other hand, when $IE_Y > 1$ intercrop wheat row yield is significantly greater than that of a sole crop wheat row yield due to the presence of an intercrop pea row: this is called facilitation. By analogy, we calculated the interspecific interaction index by considering the N accumulated in shoots (IE_N).

V.2.4.6. Intraspecific interaction yield index

Finally we proposed to evaluate the effect of the presence of wheat on wheat yield corresponding to the intraspecific interactions by calculating the wheat intraspecific interaction yield index (IA_Y) by analogy with the equation provided by Jacquard (1968) for IE_Y as follows:

$$IA_Y = \frac{Y_{W-SC}}{2 \times Y_{W-SC1/2}}$$

IA_Y was calculated separately for each intercrop replicate using the replicate of $Y_{W\text{-}SC}$ and the mean half density sole crop yield values across all replicates for $Y_{W\text{-}SC1/2}$ to eliminate the variation in the ratio attributed to half density sole crop yield variability. We multiply the half density sole crop yield by two in the calculation in order to compare sole crops and the half density sole crops on a plant or row basis as we did for the interspecific interaction index.

When $IA_Y = 1$ intraspecific competition is nil, which means that the addition of a wheat row to a sole crop with double spaced rows did not affect wheat row yield. When $IA_Y < 1$ simple spaced wheat row yield is reduced by intraspecific competition. On the other hand, when $IA_Y > 1$ simple spaced wheat row yield is increased by intraspecific interaction (facilitation). By analogy, we calculated the IA by considering the N accumulated in shoots and called it IA_N.

V.2.4.7. Cumulative Relative Efficiency Index

The relative performance of wheat and pea for biomass production was evaluated by calculating the cumulative relative efficiency index (REIc) (Connolly 1987). This index compares the proportional change in total dry weight (K) within a given time interval (t_1 to t_2), of one species relative to another. REIc for a wheat – pea intercrop (IC) is the ratio of the proportional DW increase between t_1 and t_2 of wheat (K_W) and pea (K_P):

$$K_W = \frac{DW_{W-IC}t_2}{DW_{W-IC}t_1}$$

$$K_P = \frac{DW_{P-IC}t_2}{DW_{P-IC}t_1}$$

$$REIc = \frac{K_W}{K_P}$$

REIc values were calculated for each time interval between two successive sampling dates during crop growth. REIc > 1 indicates a greater proportional growth of wheat than pea over the time period considered and vice versa when REIc < 1.

V.2.4.8. Comparative absolute growth rate

The comparative absolute growth rate (CGR) compares the dry weight growth rate (GR) within a given time interval (t_1 to t_2), of one species relative to another. CGR for a wheat – pea intercrop (IC) is the ratio between the growth rate of wheat (GR_W) and pea (GR_P):

$$GR_W = \frac{DW_{W-IC}t_2 - DW_{W-IC}t_1}{t_2 - t_1}$$

$$GR_P = \frac{DW_{P-IC}t_2 - DW_{P-IC}t_1}{t_2 - t_1}$$

$$CGR = \frac{GR_W}{GR_P}$$

CGR values were calculated for each time interval between two successive sampling dates during crop growth. CGR > 1 indicates a faster growth rate of wheat then pea over the time period considered and vice versa when CGR < 1.

At sowing, for both REIc and CGR, the total seed weight was taken as total biomass assuming a 1000-grain standard weight of 50 g and 150 g for wheat and pea respectively.

V.2.5. Statistics

Analysis of variance was carried out using the AOV procedure of the 2.7.1 version of R software (R development Core Team 2007) for each year, considering N treatments as the main factor, crops as a sub-factor and interaction between N treatments and crops. All data were tested for normal distribution using the Shapiro-Wilk test and pairwise comparisons were performed using a two-tailed t-test to compare N treatments within crops and crops within N treatments at a significance threshold of p=0.10 chosen to take into account the variability within some measurements in our experiments in particular for data sampled at various stages and analysed in terms of dynamics. According to Sheskin (2004), the significance of differences between treatments can be estimated using simple planned comparisons when comparisons have been planned beforehand, regardless of whether or not the omnibus F value is significant. Finally, confidence intervals for the means of AG, SPlantAG, APlantAG, CC, LER, IE, IA, REIc and CGR values were calculated from replicates assuming normal distribution according to Sheskin (2004).

V.3 Results

V.3.1. Interspecies growth dynamics

For both experiments, wheat emerged earlier than pea and was more efficient than pea from sowing (S) to the beginning of wheat stem elongation (E1cm). Indeed, during the first growth interval REIc values were above 1, indicating that the proportional dry weight increase of wheat was greater than that of pea in all experiments and N treatments (**Table 7**). Similar results were found for CGR. Moreover, CGR values were greater than REIc values, indicating that the advantage of wheat dry weight growth rate (GR) over pea was greater than for the corresponding proportional change in total dry weight (K).

Afterwards, for all N treatments and experiments, REIc values were close to or less than 1 during the two following growth periods (E1cm to BPF and BPF to WF) indicating that the proportional growth of pea was at least similar to that of wheat and mostly faster. CGR values from E1cm to BPF and BPF to WF were less than values calculated for sowing to E1cm but were almost always greater than 1 (except for N0 between BPF and WF).

Next, from WF to harvest maturity, wheat proportional growth was faster than that of pea in all treatments, even though REIc values were significantly different from 1 only for N0 (Exp. I) and N140 (Exp. II). Similar results were found for CGR in Exp. I while in Exp. II CGR values were about 0 (except for N60+).

Finally, considering the whole growth period, REIc and CGR values were, in N0, the lowest and less than 1 (except for CGR in Exp. I) for both experiments, indicating that peas were more efficient than wheat without N fertilization both in proportional change and growth rate. Conversely, REIc and CGR values were always about 1 or more in N fertilized plots and no significant difference was found between N treatments.

	Year (Experiment)	N	Sowing to E1cm	E1cm to BPF	BPF to WF	WF to Harvest	Sowing to Harvest
REIc	2005-2006 (Experiment I)	N0	1.5 ± 0.4 +	0.6 ± 0.1 *	0.7 ± 0.2 +	1.4 ± 0.4 +	0.9 ± 0.0 *
		N100	2.1 ± 0.9 +	0.7 ± 0.1 *	0.8 ± 0.2	1.0 ± 0.1	1.1 ± 0.1
		N180	2.5 ± 0.5 +	0.5 ± 0.0 *	1.3 ± 0.2	1.1 ± 0.1	1.9 ± 0.3 *
		Mean	2.0 ± 0.7 *	0.6 ± 0.1 *	0.9 ± 0.3	1.2 ± 0.3	1.2 ± 0.5
	2006-2007 (Experiment II)	N0	4.4	0.3	0.6 ± 0.1 *	1.5 ± 0.6	0.6 ± 0.3 *
		N60+	6.1	0.4	0.8 ± 0.1 +	1.1 ± 0.2	2.2 ± 1.0 +
		N80	4.0	0.5	0.6 ± 0.1 *	1.9 ± 1.1	2.1 ± 0.8 +
		N140	4.4	1.1	0.5 ± 0.3 *	2.4 ± 0.6 *	2.3 ± 0.8
		Mean	4.7 ± 0.9 *	0.6 ± 0.4 +	0.6 ± 0.2 *	1.7 ± 0.8	1.7 ± 1.0
CGR	2005-2006 (Experiment I)	N0	2.5 ± 0.8 *	1.3 ± 0.6	0.6 ± 0.2 *	4.3 ± 2.0 *	1.4 ± 0.1 *
		N100	3.6 ± 1.7 +	1.9 ± 0.6 +	1.3 ± 0.3	1.5 ± 0.7	1.7 ± 0.2 *
		N180	4.8 ± 1.2 +	1.9 ± 0.5	4.0 ± 0.4 *	4.3 ± 1.6	3.0 ± 0.5 *
		Mean	3.5 ± 1.5 *	1.7 ± 0.6 *	1.7 ± 1.5	3.3 ± 1.9 *	1.9 ± 0.7 *
	2006-2007 (Experiment II)	N0	9.9	1.2	0.4 ± 0.0 *	0.1 ± 0.2 *	0.6 ± 0.3 +
		N60+	14.1	3.5	2.3 ± 1.2	0.8 ± 0.4	2.6 ± 1.3 *
		N80	9.1	2.9	1.2 ± 0.4	0.1 ± 0.4 *	2.5 ± 1.1 +
		N140	10.2	7.7	0.9 ± 0.8	0.1 ± 0.1 *	3.0 ± 1.2 +
		Mean	10.8 ± 2.2 *	3.9 ± 2.8 +	1.2 ± 1.0	0.3 ± 0.4 *	2.1 ± 1.3

Table 7 *Cumulative relative efficiency index (REIc) and comparative absolute growth rate (CGR) calculated for the time interval corresponding to the dates of sampling: sowing to '1cm ear' stage of wheat (E1cm), E1cm to the beginning of pea flowering (BPF), BPF to wheat flowering (WF), WF to harvest (Harvest) and for the whole growth period (Sowing to Harvest) for the different N treatments (Nx where 'x' represents N applied in kg N ha^{-1}) of experiments I and II. Values are the mean ± standard error. Single plus (+) and single asterisks (*) indicate that REIc or CGR are significantly different from 1 at P=0.10 and P=0.05 respectively. Note that a* $REIc > 1 \Leftrightarrow DW_{W-IC}t_2 / DW_{W-IC}t_1 > DW_{P-IC}t_2 / DW_{P-IC}t_1$ and a $CGR > 1 \Leftrightarrow DW_{W-IC}t_2 - DW_{W-IC}t_1 > DW_{P-IC}t_2 - DW_{P-IC}t_1$.

V.3.2. Yield and N accumulated

V.3.2.1. Yield

As expected, sole cropped, half density sole cropped and intercropped wheat yield were significantly increased by fertilizer N compared to the unfertilized treatments in both experiments (**Table 8**). In Exp. II, no significant difference was found between N treatments in wheat grain yield for sole crops, half density sole crops and intercrops while in Exp. I wheat yield was higher in N180 compared to N100 for sole crops, half density sole crops and intercrops. For both experiments, intercropped pea yields were significantly reduced with N fertilization except for N100 (Exp. I). Thus, in Exp. I, total intercrop yield was increased when fertilizer N was applied. In Exp. II, total intercrop yield was slightly the highest in N60+ and surprisingly the lowest in N140, probably due to lodging and uncontrolled wheat foliar diseases in later growth stages. The yield of wheat sole crops seemed lower than or similar to the total intercrop yield for treatments with little or no N fertilizer (N0, N60+ and N100) but higher when increasing the amount of fertilizer N (N180 in Exp. I, N80 and N140 in Exp. II).

V.3.2.2. N accumulated in shoots

As for yield, N accumulated in shoots of sole cropped, half density sole cropped and intercropped wheat was positively correlated with N fertilization in Exp. I (**Table 8**). In Exp. II it was higher in N fertilized treatments compared to N0. In Exp. II the maximum N uptake for the intercropped wheat was obtained with N60+ while in sole crop and half density sole crop the N accumulated was maximal in N140. Without N fertilizer, sole

cropped and half density sole cropped pea always accumulated significantly more N than the sole cropped wheat and than the whole intercrop except that in Exp. I the half density sole cropped pea accumulated less N than the whole intercrop. In N-fertilized plots, the whole intercrop accumulated more N than the unfertilized sole cropped pea in Exp. I but less or a similar amount in Exp. II. The intercrop as a whole acquired more N than the sole cropped wheat except when large amounts of N fertilizer were applied (N180 in Exp. I and N140 in Exp. II). Finally, intercropped pea N acquisition was reduced with N fertilization compared to N0 except in Exp. I where the maximum was in N100. Moreover, in Exp. II the intercropped pea accumulated a very small amount of N in fertilized treatments and no difference was found between N treatments.

Year	Specie	N	Grain yield (t ha^{-1})		N accumulated in shoots (kg N ha^{-1})	
			Wheat	Pea	Wheat	Pea
2005-2006 (Experiment I)	IC	N0	2.6 ± 0.3	2.2 ± 0.3	67 ± 12	81 ± 13
		N100	3.3 ± 0.5	2.4 ± 0.2	106 ± 19	99 ± 14
		N180	4.4 ± 0.9	1.6 ± 0.0	137 ± 17	75 ± 5
	SC	N0	3.8 ± 0.3	4.4 ± 0.8	77 ± 7	177 ± 30
		N100	5.2 ± 0.5		155 ± 23	
		N180	6.9 ± 0.3		209 ± 18	
	SC1/2	N0		3.2 ± 0.7		132 ± 26
		N100	4.7 ± 0.4		139 ± 22	
		N180	6.1 ± 0.6		202 ± 21	
2006-2007 (Experiment II)	IC	N0	1.4 ± 0.4	2.1 ± 0.3	44 ± 12	81 ± 10
		N60+	2.7 ± 0.6	1.2 ± 0.5	116 ± 39	48 ± 21
		N80	2.5 ± 0.2	1.2 ± 0.5	95 ± 6	48 ± 20
		N140	2.2 ± 0.4	0.8 ± 0.1	93 ± 26	40 ± 9
	SC	N0	2.8 ± 0.5	3.3 ± 1.0	70 ± 12	173 ± 37
		N60+	3.7 ± 0.2		116 ± 23	
		N80	4.3 ± 0.3		122 ± 16	
		N140	3.6 ± 0.9		143 ± 37	
	SC1/2	N0	2.4 ± 0.3	3.4 ± 0.8	61 ± 9	161 ± 28
		N60+	3.7 ± 0.8		116 ± 32	
		N80	3.3 ± 0.2		106 ± 18	
		N140	3.7 ± 0.9		178 ± 25	

Table 8 *Grain yield (t ha^{-1}) and N accumulated in shoots (kg N ha^{-1}) for the sole crops (SC), the half density sole crops (SC1/2) and the intercrops (IC) in experiments I and II for the different N treatments (Nx where 'x' represents N applied in kg N ha^{-1}). Values are the mean (n=3 to 5) ± standard error.*

V.3.3. Interaction indices

V.3.3.1. Yield aggressivity and N aggressivity

AG calculated from yield (AG_Y) and from N accumulated in shoots (AG_N) were always about 0 or more except for AG_Y in the unfertilized intercrops in Exp. II (**Figure 5a**). Moreover, AG_N values were always higher than their respective AG_Y values (0.73 and 0.37 on average respectively). AG_Y and AG_N values were significantly affected by N fertilization. In Exp. II, AG_Y and AG_N values were minimal for N0 and maximal for N60+. In Exp. I, we observed that AG_Y was maximal for N180 and AG_N was maximal for N0 while the minimum was for N100 for both AG_Y and AG_N.

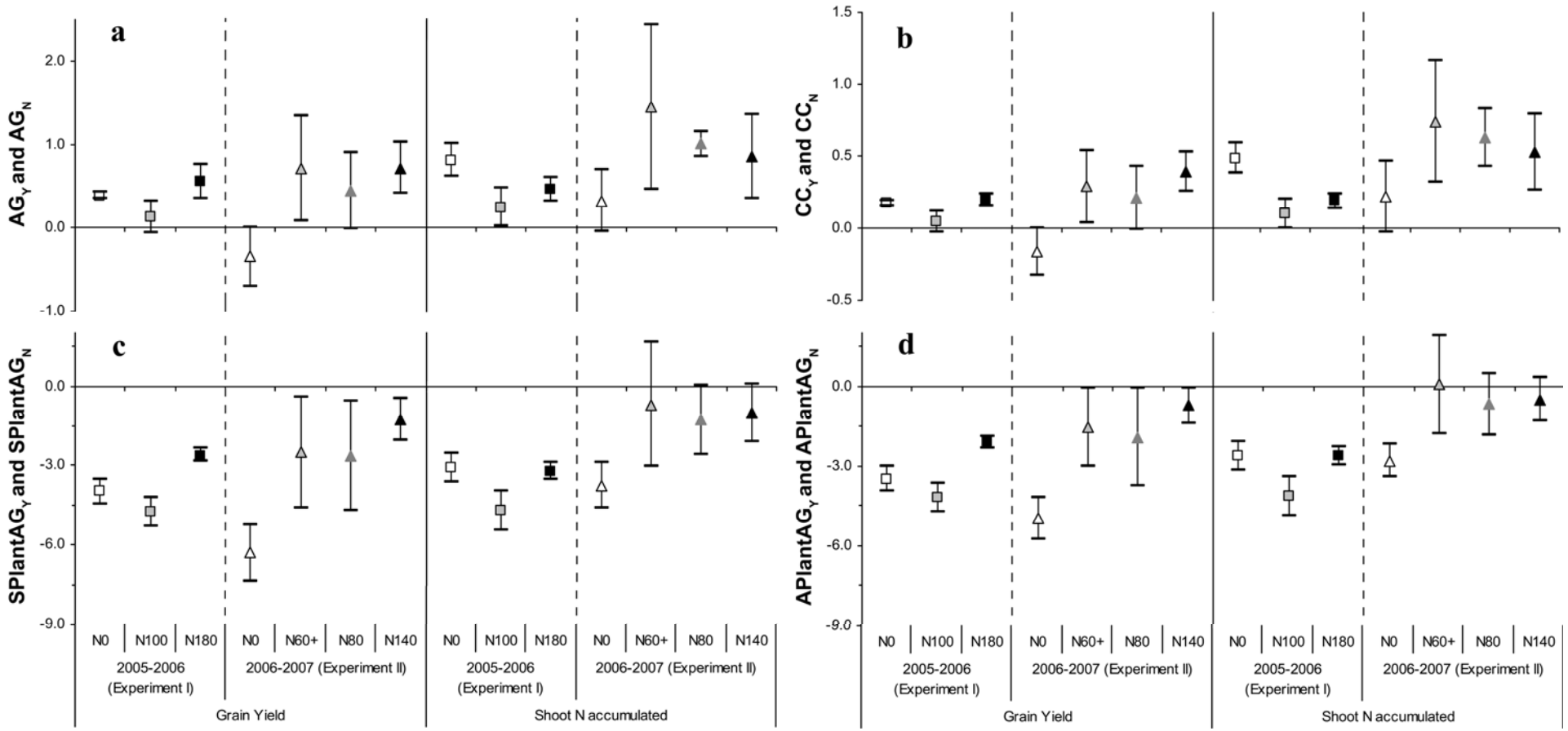


Figure 5 *Aggressivity for yield and shoot N accumulated (a;* $AG > 0 \Leftrightarrow X_{W-IC} / X_{W-SC} > X_{P-IC} / X_{P-SC}$*), change in contribution for yield and shoot N accumulated (b;* $CC > 0 \Leftrightarrow X_{W-IC} / X_{IC} > X_{W-SC} / (X_{W-SC} + X_{P-SC})$*), sowing plant aggressivity for yield and shoot N accumulated (c;* $SPlantAG > 0 \Leftrightarrow (X_{W-IC} / X_{W-SC}) / R_{W-IC} > (X_{P-IC} / X_{P-SC}) / R_{P-IC}$ *where* $R_{W\text{-}IC}$ *and* $R_{P\text{-}IC}$ *are the species sowing proportions in intercrops), actual plant aggressivity for yield and shoot N accumulated (d;* $APlantAG > 0 \Leftrightarrow (X_{W-IC} / X_{W-SC}) / R'_{W-IC} > (X_{P-IC} / X_{P-SC}) / R'_{P-IC}$ *where* $R'_{W\text{-}IC}$ *and* $R'_{P\text{-}IC}$ *are the plant densities proportions in intercrops) for the different N treatments (Nx where 'x' represents N applied in kg N ha^{-1}) of experiments I and II. Values are the mean (n=3 to 5). Horizontal bars indicate upper and lower values of confident interval at p=0.10.*

V.3.3.2. Plant aggressivity for yield and N accumulated

Plant aggressivity for yield and N accumulated calculated from the sowing proportion (SPlantAG; **Figure 5c**) of the species in the mixture was below 0 except that $SPlantAG_N$ values were not significantly different from 0 when N fertilizer was applied in Exp. II. Similar results were found for plant aggressivity for yield and N accumulated calculated from the actual plant densities (APlantAG; **Figure 5d**). SPlantAG values were always lower than their respective APlantAG for both yield (-3.44 and -2.70 respectively) and N accumulated (-2.54 and -1.89 respectively) and have the same fluctuation. Moreover, for both SPlantAG and APlantAG values calculated from N accumulated were always lower than that calculated from yield, in particular with little or no N fertilizer, but not for N180 in Exp. I. As already observed for aggressivity, SPlantAG and APlantAG (for yield and N accumulated) values were significantly affected by N fertilization. In Exp. I SPlantAG and APlantAG values calculated from yield or N accumulated were minimum for N100 and maximum for N180. Conversely in Exp. II, values were lowest in N0 for both yield and N accumulated while the maximum was in N140 for yield and in N60+ for N accumulated.

V.3.3.3. Change in Contribution for yield and N accumulated

CC_Y and CC_N were always positive or zero except for the unfertilized mixture in Exp. II (**Figure 5b**), indicating that grain yield proportion of wheat in the intercrop is greater than that in the sole crops. As already observed for aggressivity and plant aggressivity, CC_N values were always higher than their respective CC_Y values except for N180 in Exp. I (0.41 and 0.16 respectively on average for all N treatments and experiments). Moreover, CC_Y and CC_N values depended on N fertilization. In Exp. I, CC_Y and CC_N values were minimum for N100 (0.05 and 0.10 respectively) and no difference was found between N0 and N180 for CC_Y (0.18 on average) while for CC_N the value was significantly higher for N0 (0.48) compared to N180 (0.19). In Exp. II, CC_Y and CC_N values were also lowest for the unfertilized treatment (-0.16 and 0.22 respectively) while the highest was for CC_Y in N140 (0.39) and for CC_N in N60+ (0.74).

V.3.4. Intercropping yield advantages

V.3.4.1. Land equivalent ratio for yield and N accumulated

Except for N80 (LER_Y only) and N140 in Exp. II, LER_Y values were above the diagonal line corresponding to $LER = 1$ (**Figure 6a**) and similar results were found for LER_N (**Figure 6b**) indicating that resources were finally used more efficiently for yield production and N accumulation than for sole crops when little or no N fertilizer was applied. LER_N values were always similar to or higher than their respective LER_Y values except for N0 in Exp. II. LER_Y of the durum wheat – winter pea intercrop was significantly negatively correlated with N fertilization. LER_Y values were 1.19, 1.17 and 1.01 for N0, N100 and N180 respectively in Exp. I and 1.15, 1.11, 0.93 and 0.84 for N0, N60+, N80 and N140 respectively in Exp. II. Similar results were found for LER_N in Exp. I (1.32, 1.25 and 1.08 for N0, N100 and N180) while in Exp. II LER_N values were highest for N60+ and lowest for N140 (1.28 and 0.88 respectively).

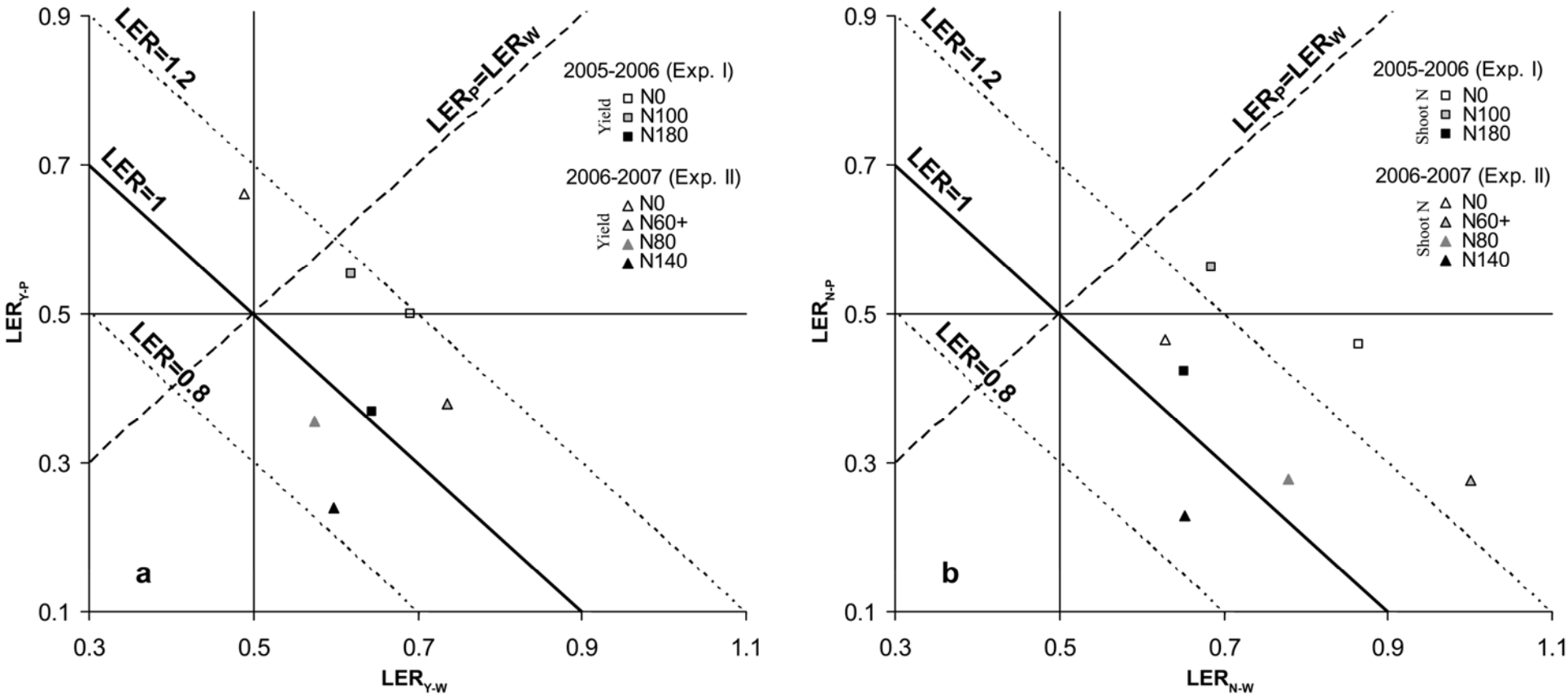


Figure 6 *Partial land equivalent ratio of pea (LER_P) as a function of the partial land equivalent ratio of wheat (LER_W) calculated from: a) grain yield or b) shoot N accumulated for the different N treatments (Nx where 'x' represents N applied in kg N ha^{-1}) of experiment. I (square symbols) and experiment II (triangle symbols). LER values above 1 indicate that the intercrops are more efficient than the sole crops for N accumulation or grain yield and vice versa. Partial LER values below 0.5 indicate that species N accumulated or grain yield (per plant or row) is less in the mixture than in the sole crop (see* ***Chapter II, Part V, Figure 4*** *for details).*

LER_Y and LER_N values were nearly always below the diagonal line corresponding to $LER_P = LER_W$ i.e. in the area corresponding to wheat's competitive advantage over peas, except for the LER_Y in N0 (in Exp. II only). More precisely, LER_Y and LER_N values were located in the area corresponding to situations where wheat suppresses pea (except N100 in Exp. I and N0 for LER_Y). $LER_{Y\text{-}P}$ values were highest for N0 in Exp. II (0.66) and for N100 in Exp. I (0.55) and were lower at only 0.37 and 0.24 for N180 (Exp. I) and N140 (Exp. II) respectively. Conversely, $LER_{Y\text{-}W}$ were mostly significantly higher than 0.5 and slightly negatively correlated with N availability. Indeed, $LER_{Y\text{-}W}$ values were 0.69, 0.62 and 0.64 for N0, N100 and N180 respectively (Exp. I) and 0.49, 0.74, 0.57 and 0.60 for N0, N60+, N80 and N140 (Exp. II). This suggests that the negative effect of N fertilization on LER_Y was mainly due to the reduction of partial LER_Y values of pea ($LER_{Y\text{-}P}$) with N supply. $LER_{N\text{-}W}$ values were also always above 0.5, varying from 0.65 to 0.86 in Exp. I and from 0.63 to 1.00 in Exp. II. Finally, we observed that $LER_{N\text{-}P}$ values were always below or similar to their respective $LER_{Y\text{-}P}$ values (0.38 and 0.44 respectively). Conversely $LER_{N\text{-}W}$ values were always above or similar to their respective $LER_{Y\text{-}W}$ values (0.75 and 0.62 respectively).

V.3.4.2. Intraspecific and interspecific interaction effects on yield and on N accumulated

According to the definition of IE, the lower the value of the index, the stronger is the interspecific competition; the same interpretation being true for values of IA but for intraspecific competition. IE_Y and IA_Y values were always below 1, indicating that both interspecific and intraspecific competition reduced wheat yield (on a row basis) compared to the half density sole crop (**Figure 7a**). Similar results were found for IE_N and IA_N (**Figure 7b**) except that IE_N values were 10 in N60+ (Exp. II). Moreover, we observed that all values are located above the diagonal line corresponding to $IE = IA$, indicating that intraspecific competition of durum wheat was stronger than interspecific competition with winter peas for both grain yield and N accumulated. More precisely, this suggests that in our experiment a wheat row reduced wheat yield and N accumulated more than a pea row.

IE_Y values were lowest for N0 in Exp. I (0.56) and also in Exp. II (0.58) which was similar to N140 (0.59). This indicates that interspecific competition (peas/wheat) was greatest without N fertilizer and for N140 in Exp. II. IE_N was also lowest for N0 in Exp. I (0.48) and for N140 in Exp. II (0.52) while it was 0.72 in N0 (Exp. II). For both experiments, IE_Y was increased when N fertilizer was applied (except for N140). In Exp. II, IE_Y values were 0.73 and 0.74 for N60+ and N80 (1.00 and 0.89 for IE_N). In Exp. I no significant difference was found between N100 and N180 for IE_Y (0.69 and 0.73 respectively) while their respective IE_N values were 0.76 and 0.68. In contrast to the IE_Y index, IA_Y was slightly affected by N fertilizer and experiment, with values ranging from 0.41 to 0.56 in Exp. I and from 0.49 to 0.65 in Exp. II. Similar results were found for IA_N in N-fertilized treatments, with values ranging from 0.52 to 0.56 in Exp. I and from 0.50 to 0.57 in Exp. II. However, in N0 (Exp. I) values were only 0.40 and 0.28 for IA_Y and IA_N respectively.

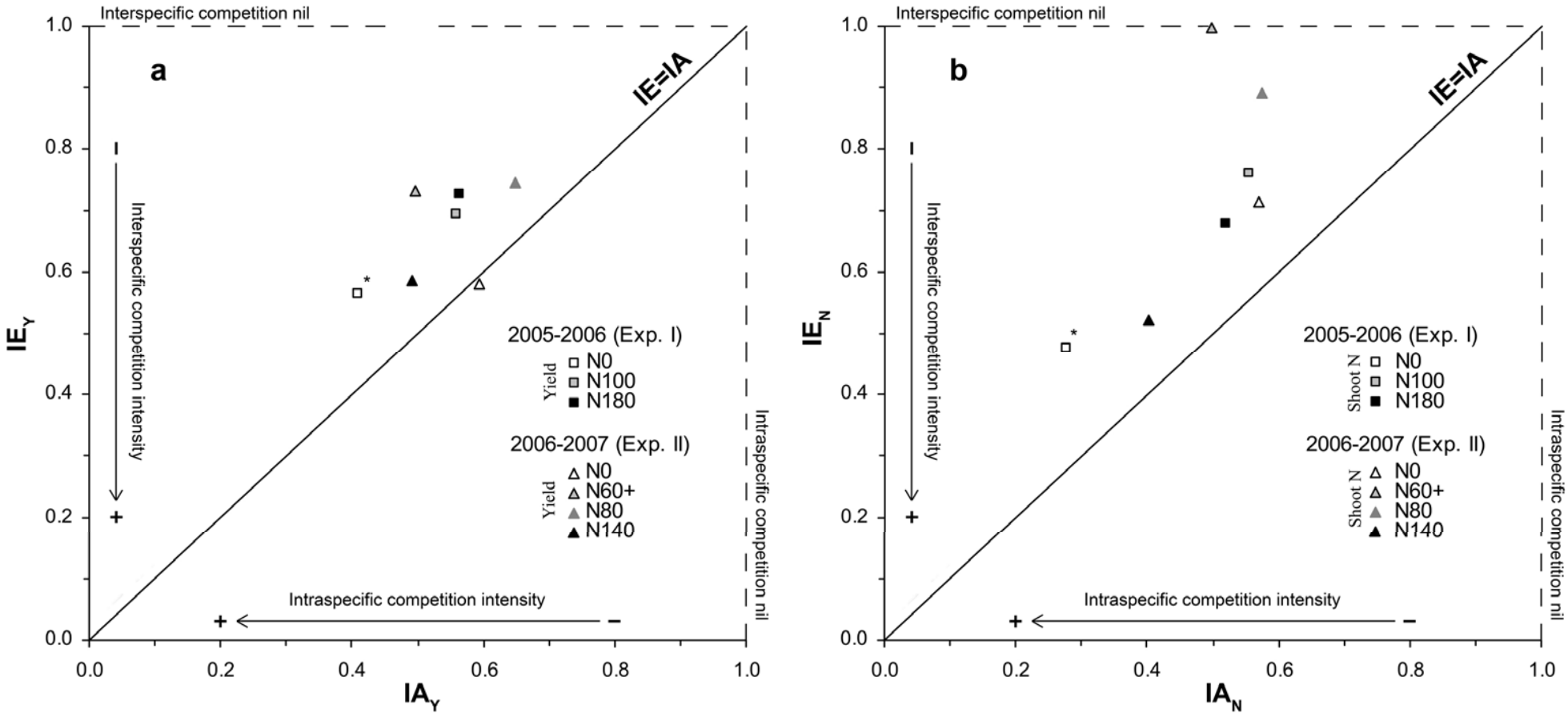


Figure 7 *Wheat interspecific interaction index (IE) as a function of wheat intraspecific interaction index (IA) calculated from: a) grain yield or b) shoot N accumulated for the different N treatments (Nx where 'x' represents N applied in kg N ha^{-1}) of experiment I (square symbols) and experiment II (triangle symbols). * indicates that the half density sole crop wheat reference was the N100 treatment (experiment I only).*

V.4 Discussion

V.4.1. Growth dynamics

Sequential measurements of crop growth allowed a better understanding of competitive interactions in dynamics and mechanisms in intercrops and sole crops compared to a single measurement of final yield (Connolly et al. 1990; Andersen et al. 2004). Indices such as REIc and CGR could therefore be useful to understand species dynamics but they need to be clearly defined and must have relevant meaning to not lead to misinterpretation in data analysis. In our work, the use of REIc and CGR indicates that species dynamics changed over time. In particular they showed that wheat had a better start than peas, at least until wheat stem elongation, which was certainly the result of faster seedling emergence and root growth (Hauggaard-Nielsen et al. 2001a). Then, until wheat flowering, we observed that pea's proportional change in total dry weight was faster than that of wheat whereas its growth rate was slower indicating that REIc and CGR are not providing the same information. The main point is that unlike REIc, which is based on the proportional dry weight increase of the species, CGR is based on the absolute growth rate of one species relative to the other. As an illustration, if pea had produced 0.5 t ha^{-1} by time t1 and 1.5 t ha^{-1} by time t2 while wheat had produced 2 t ha^{-1} by t1 and 4 t ha^{-1} by t2, then the REIc value will be $\frac{4/2}{1.5/0.5} = 0.66$ while the CGR will be $\frac{(4-2)/(t2-t1)}{(1.5-0.5)/(t2-t1)} = 2$. This indicates that the proportional growth of pea was higher than that of wheat while its growth rate was slower. Then REIc cannot be analysed without considering the absolute values of dry weight, which is not the case for CGR. Consequently when species' dry weights differ considerably, CGR seems more suitable than REIc to compare species' relative performance, crop dynamics and crop competitiveness. In our experiments this was well illustrated and true when calculating these indices from the beginning of wheat stem elongation (E1cm) to the beginning of pea flowering (BPF) and from wheat flowering (WF) to harvest (**Table 7**).

V.4.2. Interaction index for yield and N accumulated

Aggressivity (AG), defined as the difference between wheat and pea partial LER values, quantifies how much the relative yield or the relative N accumulated by one crop is greater than that of another. This index is often used to evaluate how aggressively a species behaves in a mixture but it seems that its meaning is not well understood in the literature. Many authors (e.g. Dhima et al. 2007) consider that: i) both crops are equally competitive when AG is zero, ii) wheat is the dominant crop when AG is positive and iii) wheat is the dominated crop when AG is negative. A major limitation of this index is that it needs a clear definition of 'dominant' and 'dominated' but few authors have given one. Moreover, a species could be dominant during early growth stages but later be dominated by the other species. Williams and McCarthy (2001) demonstrated that functional curves of AG values are parallel to the diagonal where $LER_W = LER_P$ and may cross over with different competition scenarios. More precisely $AG = 0 \Leftrightarrow LER_W = LER_P$ can be obtained when $LER_W = LER_P \geq 0.5$ or when $LER_W = LER_P \leq 0.5$ i.e. when both intercropped species have the same advantage or disadvantage respectively for yield or N accumulated compared to their corresponding sole crops. Another point is that $AG > 0 \Leftrightarrow LER_W > LER_P$ could be obtained when the mixture is: i) beneficial to both species but more for wheat than for pea ($LER_W > LER_P > 0.5$), ii) beneficial to wheat and harmful to pea ($LER_W > 0.5 > LER_P$) or iii) harmful to both crops but less so for wheat than for pea ($0.5 > LER_W > LER_P$) and vice

versa when $AG < 0 \Leftrightarrow LER_P > LER_W$. Consequently AG is not clear because it fails to identify what is happening between the two species because their relative data (yield or N accumulated) are subtracted, indicating that the AG index allows comparison of species efficiency in mixtures only on an area basis. In our situation this assumes that both species occupied the same area in the intercrop, because our design consisted of the regular alternation of wheat and pea rows. In our experiment, AG_Y and AG_N were always about 0 or more, and higher in N fertilized treatments than N0 (Exp. II only). Finally AG_N values were always higher than their corresponding AG_Y values. Thus we can only conclude that in our experiment and on an area basis: i) wheat does better in mixtures than pea compared to their respective sole crops, ii) wheat's advantage is higher for N accumulated than for grain yield and iii) wheat's advantage is higher for the N fertilized treatments.

Another critical point concerning AG is that the density of each species in the intercrop is not taken into account in the calculation provided by Snyder at al. (1994). This is a key point in experiments where species' sowing densities are very different. In our situation pea plants represent only 21% of the intercropped plant population and it is therefore interesting to consider the sowing proportion of the species in the mixture. Plant aggressivity, which considers the sowing densities (SPlantAG), compares the efficiency of an intercropped pea sowing density with that of an intercropped wheat sowing density while APlantAG, calculated from actual plant density, compares the efficiency of an intercropped pea plant cover with that of an intercropped wheat plant cover. Unlike AG, SPlantAG (or APlantAG) is always negative, suggesting that a seed (or plant) of pea grows more efficiently than a seed (or plant) of wheat compared to their respective sole crops and consequently the advantage of the legume is greater for the unfertilized treatments (significantly in Exp. II) and greater for grain yield. We see that AG and SPlantAG vary similarly in relation to N level because we considered the sowing density which was similar for all the intercrops whatever the N treatment or experiment. The choice between SPlantAG and APlantAG depends on whether we wish to consider what happened between sowing and emergence and more precisely to evaluate a species' ability to emerge. In our experiment APlantAG values were always higher than SPlantAG because the percentage pea emergence was slightly higher than that of wheat. Moreover, the percentage emergence of wheat and pea was not affected by N treatments and consequently APlantAG varies in the same way as SPlantAG. As a consequence in our example both SPlantAG and APlantAG are about equally useful, which would not be the case if the percentage emergence of wheat and pea were greatly different or affected by N treatments. Nevertheless, by analogy with AG, SPlantAG (and APlantAG) cannot determine whether a single seed (or a single plant) of wheat or pea is dominant or dominated, or explain what is happening between the intercropped species. However SPlantAG and APlantAG allow the comparison of seed (and plant) efficiency when intercropped compared to their corresponding sole crops.

For both AG and PlantAG (SPlantAG or APlantAG) we observed that values obtained for N accumulated were mostly higher than values for grain yield as already mentioned. In order to evaluate wheat and pea aggressivity for N it would be interesting to consider the N accumulated from soil by the legume instead of the total N accumulated (N from soil and N_2 from air) because competition for N between wheat and pea occurred only for soil mineral N and not for the N_2. We found that the percentage of N in the legume derived from air was about 90% in the intercrop and only 60% in sole crops (Bedoussac and Justes 2009, **Chapter III, Part I**). As a consequence the partial LER_N of pea considering only mineral N will be about $\frac{1-0.9}{1-0.6} = 0.25$. That of the $LER_{N\text{-}P}$ is calculated by considering both N sources. This shows that the AG and the PlantAG (SPlantAG or APlantAG) calculated without considering the N accumulated from air are much greater than the values given in this paper (calculated from the total N accumulated). This shows that durum wheat is much more

competitive for soil inorganic N than winter pea (Bedoussac and Justes 2009, **Chapitre III, Part I**). This is certainly due to faster and deeper root growth and higher N demand of the cereal, as already observed by many authors on cereal – grain legume intercrops (Jensen 1996; Fujita et al. 1992; Corre-Hellou 2005; Hauggaard-Nielsen et al. 2003; Corre-Hellou and Crozat 2005).

Another critical point concerning AG and PlantAG is that these two indices are calculated from partial LER values which are affected only by grain yield or N accumulated by the same species grown as sole crops. Conversely the change in contribution index (CC) considers the absolute amount of grain yield (CC_Y) or N accumulated (CC_N) reached for one species compared with another. As a consequence, the CC index represents the proportional change in contribution of grain yield or N accumulated in a mixture compared to sole crops. The CC index thus has a clear meaning and seems more suitable than AG and PlantAG to describe a crop's efficiency compared with to another's when intercropped. This is in good agreement with Williams and Mc Carthy's (2001) conclusions. In our experiment, CC_Y and CC_N were always positive except in N0 (Exp. II) which confirms that wheat benefited more from intercropping than peas for grain yield production and much more for N accumulated. On average for all experiments, values were 0.19 and 0.43 for CC_Y and CC_N, indicating that the contribution of wheat in the intercrop was increased by 19% for grain yield and 43% for N accumulated compared to the sole crops. Moreover, as already discussed for the previous indices, wheat's advantage was increased with N fertilization (Exp. II only).

The big reduction in pea grain yield and N accumulated with N application suggest that wheat/pea competition was increased by N fertilizer, especially when applied early in crop growth or in large amounts. However, the effect of N fertilizer on the final performance of the intercrop depended on the experiment. Weather conditions seem to have been less favourable to the legume in Exp. II than in Exp. I due to the coarse soil structure, the low soil water content at sowing, (which was only partially compensated by irrigation) and the low winter temperatures, which seem to have affected peas more than wheat. Indeed, pea seeds had a greater water demand than those of wheat because of their greater size, emerging later and hence at lower temperatures than wheat in Exp. II. Consequently, the gap between the early growth of the two species was increased (Bedoussac and Justes 2009, **Chapitre III, Part I**) and was certainly accentuated by the faster root growth of wheat (Hauggaard-Nielsen et al. 2001a) and by the establishment of nodulation which is costly in energy and nutrients and could have reduced early pea growth. Finally, although the CC index seems better able to show whether one crop is more efficient than another under given conditions, it cannot define the overall intercrop performance for grain yield or N accumulated.

V.4.3. Intercropping advantages for yield and N accumulated

Land equivalent ratio for yield (LER_Y) and N accumulated (LER_N) are indicators of the relative performance of crops in mixtures compared with sole crops for grain yield and N accumulated respectively. LER_Y expresses the results of competitive interactions between the crops occurring throughout the growing season on grain yield production while LER_N evaluates the intercrop's use of N sources (soil mineral N and N_2 from air). In our experiment, LER_Y and LER_N values were mostly above the diagonal line corresponding to LER = 1 except with large N fertilizer applications. This indicates that resources were finally used up to 21% more efficiently for yield production compared to sole crops and confirms that intercrops can increase the use of N sources by up to 32%, especially when little or no N fertilizer is applied. LER_Y and LER_N values were nearly always below the diagonal line corresponding to $LER_P = LER_W$, i.e. in the area where wheat has a competitive advantage over peas, except for the unfertilized mixtures in Exp. II. The adverse effect of N availability at the end of winter (soil mineral N content at the end of winter and early N fertilization) on LER_Y and LER_N

seems mostly due to the intensification of competition for light in early stages between component crops which had little effect on wheat but significantly reduced intercropped legume dry weight. This indicates that wheat benefited more from N fertilization than peas and confirms that intercropping is more suitable to systems with low N supply, whatever the amount and timing of N application (Fujita et al. 1992; Jensen 1996; Bulson et al. 1997). Peas had higher interspecific competitive ability at low N levels, the converse being true for wheat because of: i) the reduction in N_2 fixation with N application (Voisin et al. 2002; Ghaley et al. 2005) and ii) the amplification of differences in species growth dynamics with N supply (Hauggaard-Nielsen and Jensen 2001; Ghaley et al. 2005). In particular when N fertilizer was applied early or in large amounts we observed a big increase in the cereal growth in winter and early spring. Hence, when the legume's growth was expected to increase markedly, there was less light available to it, which reduced its dry weight and consequently that of the whole intercrop.

All the indices described previously (AG, PlantAG, CC and LER) compare pure crops in simple spaced rows with mixed crops and then consider the balance between intra- and interspecific interactions (Cruz and Soussana 1997). In order to evaluate separately intra- and interspecific interaction these authors proposed to compare simple spaced row pure crops (SC) and mixed crops (IC) with double spaced row pure crops (SC1/2) as described previously in this paper (**Figure 1**, see **Chapter I, Part III**). In our work this was achieved by calculating intra- and interspecific indices for yield (IA_Y and IE_Y respectively) and for N accumulated (IA_N and IE_N respectively) to compare intraspecific and interspecific interactions easily. Intra- and interspecific indices for yield and for N accumulated were always less than 1 (except for IE_N in N60+ of Exp. II) indicating that wheat yield and N accumulated (on a row basis) were reduced by interspecific and intraspecific competition compared to their half density sole crop. We also observed that intraspecific competition was stronger than interspecific competition for both grain yield and N accumulated. This indicates that in our experiment a wheat row reduces wheat yield and N accumulated more than a pea row. Moreover interspecific competition (IE) was greatest without N fertilization while intraspecific competition was not affected by N fertilization. Consequently, considering all N treatments and experiments, we observed greater variability in IE_Y and IE_N than in IA_Y and IA_N. These results indicate that the effect of a wheat row on another wheat row (intraspecific competition) is of a similar intensity whatever the N availability and experiment because a sole wheat crop is homogeneous. However interspecific competition (the effect of a pea row on a wheat row) depends strongly on N availability. Indeed, N fertilization has a big effect on wheat growth, especially in the early stages: according to Bedoussac and Justes (submitted, **Chapter IV, Part I**) there is certainly less incoming photosynthetically active radiation available for the pea in the intercrop because of shading by wheat, causing some etiolation and slower growth of the legume.

V.5 Conclusion

Intercrops are more suited to low N input systems, certainly due to a high degree of complementary N use between the two species compared with conventional highly fertilized systems. Such results have been reported for several cereal – legume intercrops grown under arid, semi-arid, tropical and temperate climates (Fujita et al. 1992; Ofori and Stern 1987; Jensen 1996). Our work confirms that the choice of indices is important to understand well species interactions, competitiveness and intercrop efficiency compared with sole crops. In particular, AG, SPlantAG or APlantAG do not provide the information generally claimed in the literature; their significance is unclear and cannot be analysed separately with partial land equivalent ratios. Therefore, as already suggested by Williams and McCarthy (2001), the use of these indices cannot be recommended. Instead we suggest using the CC index which has a clear meaning and allows comparison of crop efficiency as regards the total biomass

produced. LER, a relevant and versatile indicator, is helpful to illustrate the pattern of competitive outcomes in intercropping experiments, in particular when plotting values in the LER space (Williams and Mc Carthy 2001). However, according to Cruz and Soussana (1997), intra and interspecific interactions can be analyzed only by comparing intercrops with sole crops sown at half density and not directly with sole crops. Thus it can be suggested to consider the intra- and interspecific indices which might also reveal possible facilitation phenomena.

Nevertheless, the indices AG, SPlantAG, APlantAG, CC, LER, IA and IE (described and used in this paper) are based on the final grain yield or N accumulated and therefore must be considered as indicators of the final balance of all competitive interactions which occurred between the crops throughout the growth period. However, according to many authors (e.g. Connolly et al. 1990; Andersen et al. 2004), the use of environmental resources for plant growth changes over time, indicating that crops' ability to exploit resource niches and thereby capture available resources varies over time. Hence these indicators cannot explain interaction dynamics between crops, although they are useful for comparing crop interactions and crop efficiency and understanding interaction mechanisms and crop relationships. Indices such as REIc and CGR may be useful to understand species dynamics but they need to be clearly related to the process evaluated in order to avoid misinterpretation in data analysis. We suggest using CGR rather than REIc to compare species' relative performance, crop dynamics and competitiveness, particularly when the competing crops differ greatly in dry weight. However REIc and CGR consider only the intercrop components and are therefore unsuitable for evaluating intra- and interspecific interactions separately. Plotting IE_{DW} as a function of IA_{DW} at key development stages is helpful as it can: i) treat interspecific and intraspecific interactions separately, ii) evaluate dynamic interactions, iii) identify possible facilitation behaviour, iv) reveal when competition occurred during growth, v) explain consequences for wheat yield components and vi) determine key development stages. Nevertheless all these indices must always be related to their original data such as yield or N accumulated. Indeed, they cannot evaluate quantitative performance but only the relative performance of the intercrop and a sole crop. For example a high LER can be obtained with a very small amount of N accumulated or yield and conversely a low LER can be the result of a high yield or N accumulated.

Our paper focuses on the analysis of some indices that could be useful to evaluate the efficiency of wheat intercropped with pea under various N availabilities. The main point is that regardless of the use of these indices their equations and meaning must be clearly defined. In order to prevent any misinterpretation, the biological meaning of the data should always be kept in mind. The use of appropriate indices to analyse species interactions in a durum wheat – winter pea intercrop could be helpful to reveal durum wheat and legume traits suited to intercropping and also appropriate N fertilization practices.

CHAPITRE III

EVALUATION DE LA PERFORMANCE DES ASSOCIATIONS BLE DUR – LEGUMINEUSE A GRAINES POUR LA PRODUCTION DE GRAINES ET LA TENEUR EN PROTEINES DU BLE DUR

I. L'efficacité de l'association blé dur – pois d'hiver pour améliorer le rendement et la teneur en protéines du blé dur dépend de la disponibilité précoce en azote.

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

Article accepté pour publication in Plant and Soil **DOI 10.1007/s11104-009-0082-2**

Résumé

La teneur en protéines du blé dur est souvent insuffisante, particulièrement dans les systèmes à bas niveau d'intrants azotés. Le but de notre étude était de vérifier si l'association blé dur – pois d'hiver permettait d'améliorer le rendement relatif et la teneur en protéines du blé dur dans les systèmes à bas niveaux d'intrants azotés. Une expérimentation a été réalisée au cours de deux années dans le Sud-Ouest de la France avec différents niveaux de fertilisation azotés afin de comparer du blé dur (*Triticum turgidum* L., cv. Nefer) et du pois d'hiver (winter pea, *Pisum sativum* L., cv. Lucy) cultivés seuls ou en association substitutive en rang. En absence de fertilisation ou lorsque l'azote était apporté tardivement (N disponible du semis au début de la floraison du pois d'hiver inférieure à environ 120 kg N ha^{-1}), les associations sont jusqu'à 19% plus efficaces que les cultures « pures » pour le rendement et jusqu'à 32% pour l'azote accumulé mais moins efficaces que les cultures « pures » pour des niveaux de fertilisation plus importants. La teneur en protéines du blé dur était significativement supérieure dans les associations que dans les cultures « pures » (14% en moyenne) grâce à une quantité d'azote remobilisée dans les grains de blé dur supérieure dû à : i) moins d'épis par mètre carré dans les associations et ii) une quantité d'azote disponible similaire à celle des cultures « pures » en raison d'un niveau de fixation symbiotique de la légumineuse élevé (88% contre 58% en culture « pure »).

I.1 Introduction

Adapted from original manuscript

In Europe, many studies on spring barley-pea intercrops have shown that relative yield and grain protein concentration of intercropped barley are higher than in sole crops (e.g. Hauggaard-Nielsen et al. 2003) and that the yield advantage depends greatly on N fertilization. In particular, Hauggaard-Nielsen and Jensen (2001) showed that spring barley-pea intercrop advantage for yield was maximum without N fertilization and significantly reduced when N was applied, mostly due to pea yield decrease with N supply. Similar results were found for spring wheat – pea intercrops (Ghaley et al. 2005). However, no information on winter wheat – grain legume intercrops is available, despite the fact that winter crops are more suited to southern European conditions in order to avoid water stress. The aim of our study was to evaluate the effects of N availability as modified by fertilization (quantity and splitting of doses) on a durum wheat – winter pea intercrop compared with sole crops by analyzing: i) N resource use, ii) crop production, iii) potential advantages for total yield, dry weight and grain protein concentration and iv) functional relationships between N acquisition and intercropping performances for yield and cereal grain protein concentration in order to better understand species complementarities for N use.

I.2 Materials and methods

Adapted from original manuscript

I.2.1. Site and Soil

The experiment was carried out on two experimental fields of the Institut National de la Recherche Agronomique station in Auzeville (SW France, 43°31'N, 1°30'E) in 2005-2006 (Exp. I) and 2006-2007 (Exp. II) see **Chapter II, Part IV** for details.

In Exp. I, 7 t ha^{-1} sorghum residues with a C:N of 63 were incorporated on September 26, 2005 by tillage (20-25 cm depth). In Exp. II, 4 to 7 t ha^{-1} of sunflower residues – with a C:N varying between 31 to 55 according to the previous sunflower experiment – were incorporated on September 25, 2006 by tillage (20-25 cm depth) (see details in **Table 9**).

I.2.2. Experimental design

Durum wheat (W) (*Triticum turgidum* L, cv. Nefer, authority Eurodur) and winter pea (P) (*Pisum sativum* L., cv. Lucy, authority GAE recherche) were grown as sole crops (SC) and as a mixed crop (IC) in a row-replacement design see **Chapter II, Part II** for details.

In both experiments, different fertilizer N sub-treatments were evaluated on intercrops and wheat sole crops while pea sole crops were grown only without any N application see **Chapter II, Part II** for details. The two experiments (I and II), combined with various N treatments, aimed to cover a wide range of N availabilities, which can be considered as low-N-input systems for durum wheat, a very N-demanding crop (up to 300 kg N ha^{-1} for a 8 t ha^{-1} grain target).

The experimental layout for both experiments was a randomized split-plot design with N application as main plots and crops as subplots (see **Chapter II, Part II** for details), with five replicates (4 for wheat sole crops in N0 and intercrops in N180) in Exp. I and three replicates (5 for pea sole crops) in Exp. II.

		2005-2006 (Experiment I)			2006-2007 (Experiment II)			
		N0	N100	N180	N0	N60+	N80	N140
Residus incorporated	Specie	*Sorghum bicolor*			*Helianthus annuus*			
	Date	September 26, 2005			September 25, 2006			
	Mode	20-25 cm tillage			20-25 cm tillage			
	Amount (t ha^{-1})	7	7	7	5	7	4	6
	C:N	63	63	63	49	31	55	40
Soil organic N (g kg^{-1}) on 0-30 cm		0.93	1.09	1.09	1.07	1.07	1.07	1.07
Initial mineral N (kg N ha^{-1}) on 0-120 cm		37	37	37	30	52	28	46
Apparent N fertilizer use efficiency (% of N applied)	S to BPF		18 %	47 %			90 %	104 %
	S to H		62 %	64 %		18 %	72 %	40 %
Calculated efficient N fertilizer (kg N ha^{-1}) and *(N fertilizer applied)*	S to BPF		9 *(50)*	61 *(130)*			72 *(80)*	83 *(80)*
	S to H		62 *(100)*	115 *(180)*		11 *(60)*	58 *(80)*	56 *(140)*
Simulated N mineralization (humus + residues) (kg N ha^{-1})	S to BPF	36	44	44	33	43	32	36
	BPF to H	30	38	40	34	42	35	37
Simulated N leaching (kg N ha^{-1})	S to BPF	13	13	13	3	4	3	4
	BPF to H	0	0	0	0	0	0	0
Calculated apparent N available (kg N ha^{-1})	S to BPF	60	77	129	60	91	129	161
	S to H	90	168	223	94	144	150	171
Measured final mineral N (kg N ha^{-1}) on 0-120 cm	IC	29	46	61	24	25	19	35
	W SC	17	36	50	13	25	15	24
	P SC	43			49			

Table 9 *Detailed data used for N-balance calculation of the different N treatments (Nx where 'x' represents N applied in kg N ha^{-1}) for various periods: from sowing (S) to the beginning of pea flowering (BPF), or BPF to harvest (H) or S to H. Data are: i) characteristics of incorporated residues, ii) topsoil organic N content, iii) 0-120 soil N mineral content at sowing, iv) apparent N-fertilizer-use efficiency, v) apparent N fertilizer available and corresponding N fertilizer applied, vi) simulated N mineralization (humus and residues) using the STICS soil-crop model, vii) simulated N leaching using STICS model, viii) calculated apparent available N and ix) soil N mineral content at 0-120 cm depth at harvest for the intercrops (IC) and the sole crops of wheat (W SC) and pea (P SC).*

I.2.3. Measurements and analysis

Crop samples taken from 0.5 m² (7 rows, 1.015 m total width, 0.5 m long) were harvested by cutting plants just above the soil surface at: i) the beginning of pea flowering (BPF) (1104 °C d^{-1} after wheat emergence (AWE) in Exp. I and 1281 °C d^{-1} AWE in Exp. II), coinciding with 'flag leaf visible' stage of wheat (Zadoks 37) and ii) at wheat flowering (WF; Zadoks 69) coinciding with the end of pea flowering (1401 °C d^{-1} AWE in Exp. I and 1746 °C d^{-1} AWE in Exp. II). At maturity, plots were mechanically harvested to determine total grain yield. pea sole crops were harvested at pea physiological maturity (1938 °C d^{-1} AWE in Exp. I and 2143 °C d^{-1} AWE in Exp. II) while wheat sole crops and intercrops were harvested at wheat physiological maturity (Zadoks 92; 2429 °C d^{-1} AWE in Exp. I and 2824 °C d^{-1} AWE in Exp. II) see **Chapter II, Part III** for details.

I.2.4. Calculations

The data used to calculate N balances are shown in **Table 9**. Mineralization of N residues, humus N mineralization and N leaching over the growing period were estimated using the STICS soil-crop model (Brisson et al. 2008) and parameter values recently proposed by Justes et al. (2009) for mineralization of N residues. Mineral N available ($N_{available}$) was estimated for the two experiments as follows:

$$N_{available} = InitialNmin + Nmineralization - Nleaching + N \times FUE$$

with FUE (apparent Fertilizer-N Use Efficiency) calculated as follows:

$$FUE = \frac{\left(Nac_{W-SC(N)} - Nac_{W-SC(N0)}\right) - \Delta InitialNmin_{N-N0} - \Delta Nmineralization_{N-N0} - \Delta Nleaching_{N-N0}}{N}$$

where $Nac_{W\text{-}SC(N)}$ is the N accumulated by the wheat sole crop with N fertilization and $Nac_{W\text{-}SC(N0)}$ without N fertilization; Δ is the difference between fertilizer-N and N0 treatments for: i) initial mineral N in soil ($\Delta InitialNmin_{N\text{-}N0}$), ii) net N mineralization from humus plus residues – which could lead to N immobilization – ($\Delta Nmineralization_{N\text{-}N0}$) and iii) nitrate leaching below 120 cm depth ($\Delta Nleaching_{N\text{-}N0}$).

The percentage of plant N derived from N_2 fixation (%Ndfa) was determined using the ^{15}N natural abundance method for un-fertilized treatments (Amarger et al. 1979; Unkovich et al. 2008). In N-fertilized intercrops treatments a similar approach was used with some adaptation, i.e. taking into account as a reference crop the durum wheat in the intercrops fertilized at the same rate, making the rather dubious assumption that pea can take up the same mineral N in soil as durum wheat by exploring the same soil volume. The %Ndfa in sole cropped and intercropped pea was calculated using the natural variation in ^{15}N abundance expressed in terms of δ units, which are the parts per thousand (‰) deviation relative to the nominated international standard of atmospheric N_2 (0.3663% of ^{15}N), for pea ($\delta^{15}N_{pea}$) and for a reference crop ($\delta^{15}N_{ref}$). The correction factor β reflecting the $\delta^{15}N$ of legume shoots that are fully dependent upon N_2 fixation was assumed equal to be -1‰ for pea according to Voisin et al. (2002). In this way it is possible to determine the degree of isotopic discrimination between the stable isotopes ^{14}N and ^{15}N to calculate the %Ndfa according to the equation provided by Shearer and Kohl (1986):

$$\%Ndfa = 100 \times \left(\frac{\delta 15N_{ref} - \delta 15N_{pea}}{\delta 15N_{ref} - \beta} \right)$$

The calculation assumes that the $\delta^{15}N_{ref}$ provides a suitable measurement of the $\delta^{15}N$ of soil mineral N available for pea (Peoples et al. 2001; Unkovich et al. 2008). At wheat flowering and pea physiological maturity, the %Ndfa was calculated using as reference the average value between intercropped wheat harvested at wheat flowering and that harvested one month later at wheat physiological maturity. For the unfertilized treatments we also used a non-fixing mutant of pea (P2 cv. Frisson) as reference crop. We considered each N treatment separately in order to take into account the effect of N fertilizer on the $\delta^{15}N$ of soil mineral N. To eliminate variations due to soil heterogeneity over short distances we took as $\delta^{15}N_{ref}$ the average of all the replicates of the intercropped wheat harvested at wheat flowering and of all the replicates of the intercropped wheat harvested at wheat physiological maturity and only one value for pea Frisson which did not grow very well (and with a developmental shift in comparison with cv. Lucy). Finally, N accumulated from air (QNdfa) was calculated as the product of accumulated shoot N and %Ndfa.

The land equivalent ratio (LER) is defined as the relative land area required when growing sole crops to produce the dry weight (LER_{DW}), the yield (LER_Y) or the N accumulated in shoots (LER_N) achieved in intercrop (Willey 1979a). LER for a wheat – pea intercrop is the sum of the partial LER values for wheat (LER_W) and pea (LER_P), in accordance with De Wit and Van Den Bergh (1965) see **Chapter II, Part V** for details.

I.2.5. Statistics

Analysis of variance was carried out using the AOV procedure of the 2.7.1 version of R software (R development Core Team 2007) for each year, considering N treatments as the main factor, crops as a sub-factor and interaction between N treatments and crops. All data were tested for normal distribution using the Shapiro-Wilk test and pairwise comparisons were performed using a two-tailed t-test (P=0.05 or P=0.10) to compare N treatments within crops and crops within N treatments. According to Sheskin (2004), the significance of differences between treatments can be estimated using simple planned comparisons when comparisons have been planned beforehand, regardless of whether or not the omnibus F value is significant. Correlation coefficients calculated from linear regressions were statistically analysed using the table proposed by Fisher and Yates (1938). Finally, confidence intervals for the means of LER values and partial LER values were calculated from replicates assuming normal distribution according to Sheskin (2004) in order to compare the means of LER with 1 and partial LER values with 0.5.

I.3 Results

I.3.1. N availability according to treatments

Apparent N available depended greatly on the preceding crops and the differences in their N treatments, experimental N fertilization, N fertilizer efficiency, soil N mineralization (soil + crop residues), initial N mineral content and weather conditions. In Exp. I, soil N mineral content at sowing was 37 kg N ha^{-1} on average for all N treatments, while in Exp. II it was ca. 30 kg N ha^{-1} for N0 and N80 and ca. 50 kg N ha^{-1} for N60+ and N140 (**Table 9**). Considering the whole growing period, apparent N fertilizer-use efficiency (FUE) was ca. 63% for N100 and N180 in Exp. I and 11%, 58% and 56% for N60+, N80 and N140 in Exp. II, respectively.

The mineralization simulated using STICS soil-crop model indicated that ca. 50% of residues and humus net N mineralization would have occurred between sowing and BPF and the other 50% between BPF and harvest due to increasing soil temperature. Throughout the growing period, residues and humus net N mineralization calculated in Exp. I were lower in

N0 than in N-fertilized treatments, due to a lower soil organic N content. In Exp. II, net N mineralization calculated was lowest for N0 and N80, highest for N60+ and intermediate for N140.

Finally, apparent N available over the whole growing period was lowest for N0 for both experiments (ca. 92 kg N ha^{-1}), highest for N180 (223 kg N ha^{-1}) and intermediate for N60+ and N80 (ca. 147 kg N ha^{-1}) and for N100 and N140 (ca. 170 kg N ha^{-1}). N treatments differed also in the N availability dynamics; indeed, apparent N available calculated from sowing to BPF represented 46% of apparent N available over the growing period for N100, 58% for N180, 65% for N0 and N60+ and 90% for N80 and N140.

Finally, residual soil mineral N content measured at harvest on 120 cm depth was different between treatments (**Table 9**). Without N fertilizer, pea sole crop soil mineral N at harvest was significantly higher than that of the intercrop itself higher than that of the wheat sole crop. No difference was found between intercrop and wheat sole crop for N60+ and N80 while mineral N content at harvest was higher by 10 kg N ha^{-1} on average in intercrop than in wheat sole crop for N100 and N180 (Exp. I) and for N140 (Exp. II).

I.3.2. N complementarities in intercrop

I.3.2.1. N acquisition and N accumulation in shoots

As expected, sole cropped wheat N uptake and then N accumulation in shoots was positively correlated with N fertilization in both experiments (**Figure 8**). Similar results were obtained for the intercropped wheat in Exp. I, while in Exp. II the maximum N uptake was obtained with N60+ and the minimum with N0. Without N fertilizer, sole cropped pea always accumulated significantly ($p<0.10$) more N than the sole cropped wheat and than the whole intercrop. In N-fertilized plots, the whole intercrop accumulated more N than the sole cropped pea in Exp. I, but less or a similar amount in Exp. II, due to the decrease in the intercropped pea's apparent accumulated N. The intercrop as a whole always acquired more N than the sole cropped wheat and the difference was reduced and became non-significant with the increase in N availability (N140 and N180).

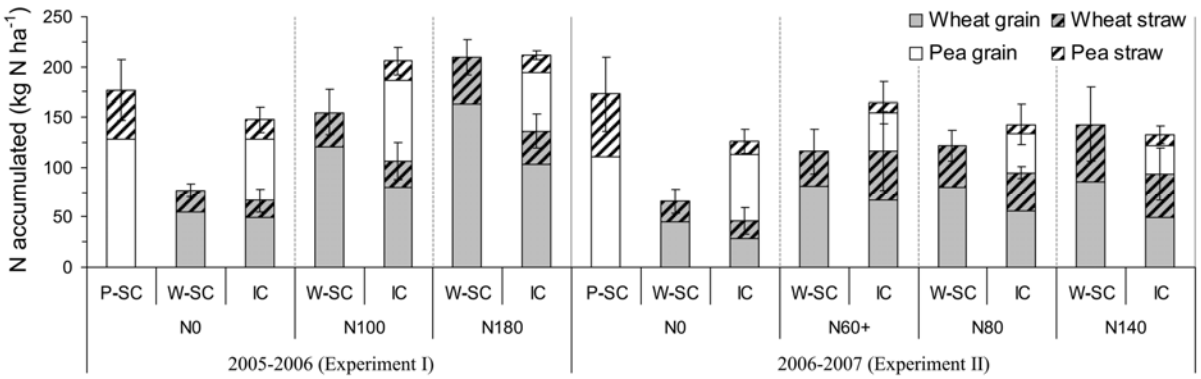


Figure 8 *N accumulated (kg N ha^{-1}) in sole crops (SC) and intercrops (IC) of pea (P) and wheat (W) in straw and grain for the different N treatments (Nx where 'x' represents N applied in kg N ha^{-1}). Values are means (n=3 to 5) ± standard error for crops N accumulated in straw and grain.*

The intercropped wheat accumulated more than 50% as much N as the sole cropped wheat (70% and 78% on average for Exp. I and II, respectively). The higher the N availability, the larger was the difference between intercropped and sole cropped wheat. Finally, intercropped pea N acquisition was reduced with N fertilization compared to N0 except in Exp. I where the maximum was in N100. Moreover, in Exp. II no difference was

found between N fertilized treatments for pea N accumulated. On average, for all N treatments, crops and years, N harvest index was 0.58 for wheat and 0.76 for pea. In Exp. I, wheat N harvest index was 0.75 for both sole crop and intercrop while in Exp. II it was 0.66 for sole cropped wheat and only 0.58 for intercropped wheat. N harvest index of the intercropped pea was ca. 0.78 whatever the N treatment and experiment while sole cropped pea N harvest index was 0.73 and 0.64 for Exp. I and II, respectively.

I.3.2.2. N_2 fixation of pea

We clearly observed that in our experiments, soil heterogeneity and N-fertilization affected $\delta^{15}N_{ref}$ more than the choice of crop reference or stage of sampling (**Table 10**). Indeed, we found that the non-fixing pea Frisson $\delta^{15}N$ was similar to that of the intercropped wheat in N0. No difference was found between intercropped wheat $\delta^{15}N$ at flowering and at maturity (**Table 10**). Moreover, intercropped wheat $\delta^{15}N$ was reduced with N fertilization compared with N0, except for N60+ in Exp. II, while no significant difference was found in N-fertilized treatments. The values of sole cropped pea $\delta^{15}N$ were slightly lower in Exp. II than in Exp. I and no difference was found between the two sampling dates for both experiments. The calculated percentage of total above-ground N acquisition derived from N_2 fixation (%Ndfa) of the intercropped pea calculated was higher than that of the sole cropped pea for all N treatments (on average 85% and 64%, respectively in Exp. I and 75% and 52%, respectively in Exp. II). In Exp. I, the %Ndfa of the intercropped pea was almost the same in N-fertilized plots and in N0 while in Exp. II, there was a large difference between the N treatments. A key point is that in Exp. II, N fertilization applied at the 'visible flag leaf' wheat stage (N60+), corresponding to the beginning of pea grain filling, seems not to have affected the legume %Ndfa compared with the unfertilized treatment (85 and 84%, respectively). Conversely, N fertilization (80 kg N ha^{-1}) applied earlier at the beginning of wheat stem elongation (N80 and N140 in Exp. II) seems to have reduced the %Ndfa compared with N0 (60% for N80 and 70% for N140). Finally, the quantity of above-ground N accumulated derived from air (QNdfa) was maximum for the sole cropped pea and greater in Exp. I than in Exp. II (**Table 10**). In Exp. I, the QNdfa of the intercropped pea was greater in N100 than in N0 and N180. On the other hand, in Exp. II, the QNdfa of the intercropped pea was the highest for N0, intermediate for N60+ and the lowest for N80 and N140.

Data	Crop		Stage	2005-2006 (Experiment I)			2006-2007 (Experiment II)			
				N0	N100	N180	N0	N60+	N80	N140
δ15N	Frisson	SC	WF	5.1***			3.1**			
	Wheat	IC	WF	5.0 ± 0.4	2.0 ± 0.5	2.2 ± 0.6	2.8 ± 0.4	3.0 ± 0.7	1.1 ± 0.7	1.1 ± 0.7
			WH	4.8 ± 0.6	2.5 ± 0.9	1.6 ± 0.4	2.3 ± 0.3	2.4 ± 0.2	1.2 ± 0.2	0.9 ± 0.4
			*Mean**	*4.9 ± 0.6*	*2.3 ± 0.8*	*1.8 ± 0.5*	*2.5 ± 0.4*	*2.7 ± 0.6*	*1.2 ± 0.4*	*1.0 ± 0.6*
	Pea	IC	WF	0.0 ± 0.2	-0.4 ± 0.3	-0.3 ± 0.2	-0.4 ± 0.3	-0.4 ± 0.6	-0.3 ± 0.0	-0.3 ± 0.2
			PH	0.1 ± 0.1	-0.7 ± 0.4	-0.8 ± 0.0	-0.4 ± 0.2	-0.5 ± 0.1	0.1 ± 0.4	-0.5 ± 0.3
			*Mean***	*0.1 ± 0.1*	*-0.6 ± 0.4*	*-0.6 ± 0.2*	*-0.4 ± 0.3*	*-0.5 ± 0.4*	*-0.1 ± 0.3*	*-0.4 ± 0.3*
		SC	WF	1.4 ± 0.4			0.6 ± 0.1			
			PH	1.0 ± 0.4			0.7 ± 0.2			
			*Mean***	*1.1 ± 0.4*			*0.7 ± 0.1*			
%Ndfa	Pea	IC	*Mean***	82 ± 2	87 ± 13	88 ± 5	84 ± 5	85 ± 7	60 ± 9	70 ± 9
		SC	*Mean***	64 ± 6			52 ± 4			
QNdfa	Pea	IC	*Mean***	66 ± 9	85 ± 7	65 ± 2	67 ± 9	42 ± 20	28 ± 7	28 ± 9
		SC	*Mean***	115 ± 29			90 ± 30			

* mean of WF and WH ; ** mean of WF and PH ; *** only one value

Table 10 *Data of ^{15}N excess ($\delta^{15}N$) values for the different N treatments (Nx where 'x' represents N applied in kg N ha^{-1}): i) $\delta^{15}N$ for a non-fixing pea (Frisson) sole crop (SC), intercropped (IC) wheat, IC pea and SC pea at wheat flowering (WF), wheat harvest (WH) and pea harvest (PH), ii) fraction of plant N derived from air (%Ndfa) of SC and IC pea calculated as the mean of WF and PH using $\delta^{15}N$ average value of wheat at WF and WH and iii) amount of N derived from air (QNdfa) of SC and IC pea at pea harvest. Values are the mean (n=3 to 5) ± standard error.*

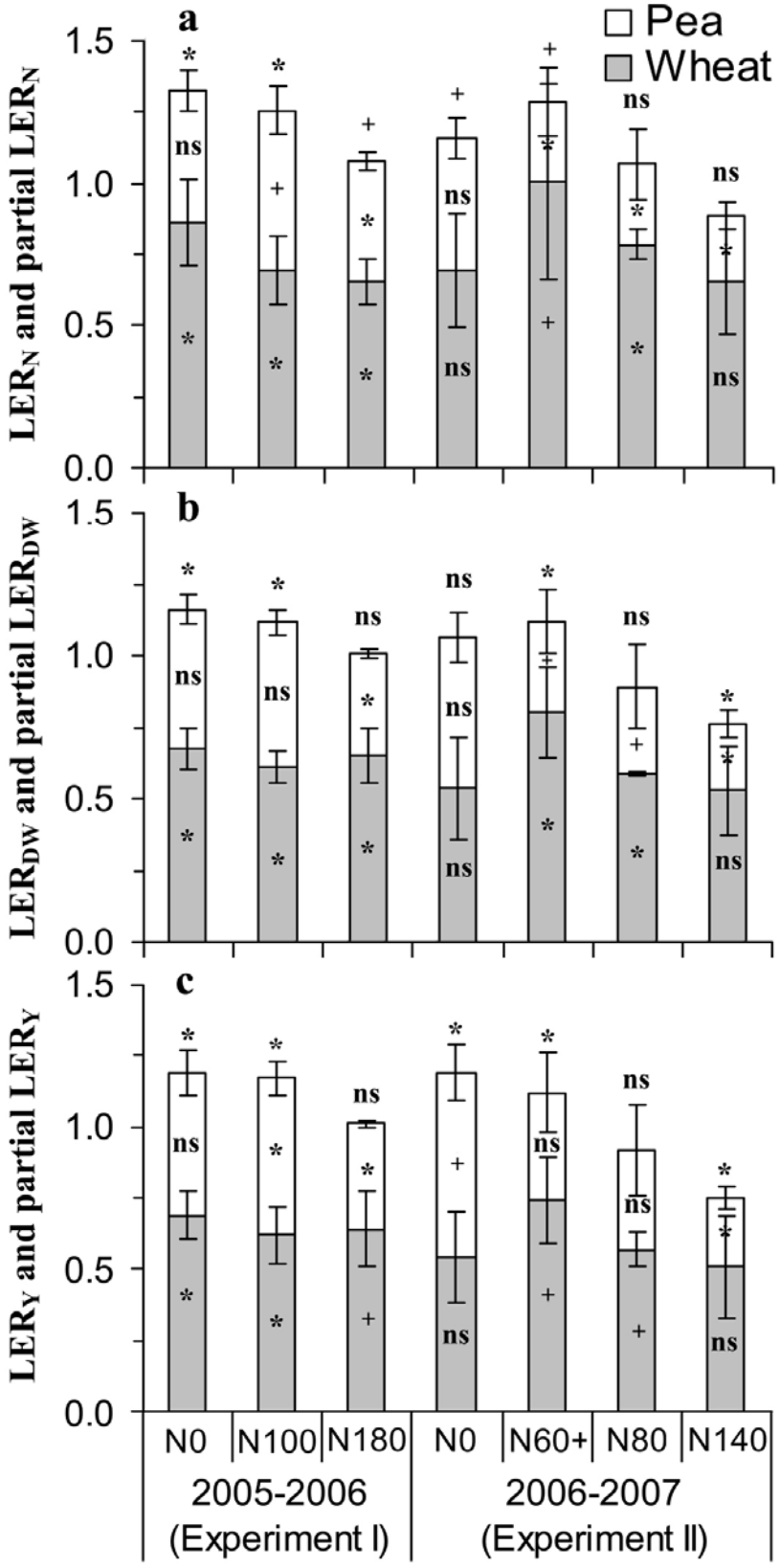


Figure 9 *Partial land equivalent ratio (LER) for wheat and pea calculated from (a) N accumulated (LER_N), (b) dry weight (LER_{DW}), (c) grain yield (LER_Y) for the two experiments and N treatments (Nx where 'x' represents N applied in kg N ha^{-1}). Values are the mean (n=3 to 5) ± standard error. Single plus (+) and single asterisks (*) above the bars indicate that LER is significantly different from 1, at P<0.10 and P<0.05, respectively. Single plus (+) and single asterisks (*) inside the bars indicate that partial LER (either for wheat or pea) is significantly different from 0.5, at P<0.10 and P<0.05, respectively; 'ns' indicates non-significant (P>0.10). LER values above 1 indicate that the intercrops are more efficient than the sole crops and vice versa. Partial LER values below 0.5 indicate that species N accumulated, dry weight or grain yield (per plant or row) is less in the mixture than in the sole crop (see* ***Chapter II, Part V*** *for details).*

I.3.2.3. Land equivalent ratio for N accumulated in shoots

LER values calculated from shoot N accumulation (LER_N) were mostly always greater than 1, i.e. 1.15 on average for all N treatments and experiments, indicating an advantage of intercrops compared with sole crops for N accumulation (**Figure 9a**). However, LER_N were lower when a large amount of N fertilizer was applied (1.08 for N140 in Exp. I, 1.06 for N80 and 0.88 for N140 in Exp. II) compared with N0 (1.32 and 1.16 in Exp. I and II, respectively). Wheat partial LER_N values were mostly always greater than 0.5, i.e. 0.73 and 0.78 on average for Exp. I and II, respectively. On the other hand, pea partial LER_N values were close to or less than 0.5 (0.48 and 0.31 on average for Exp. I and II, respectively). Wheat partial LER_N values were the highest for N0 in Exp. I and for N60+ in Exp. II and lowest in Exp. I for N100 and N180 and for N0 and N140 in Exp. II. Finally, pea partial LER_N values were slightly affected by N fertilization in Exp. I compared with N0 while values were significantly reduced with N fertilization in Exp. II (0.26) compared to N0 (0.46).

I.3.3. Intercropping dry weights and yields and wheat grain quality

I.3.3.1. Dry weight and yield

Our results indicate that intercrops shoot biomass dry weight (DW) and yield depended on N availability (**Figure 10**). On average, for all N treatments and crops, harvest index was 0.43 for wheat and 0.52 for pea. For both sole cropped and intercropped wheat, harvest index was 0.45 and 0.41 for Exp. I and II, respectively. Sole cropped pea harvest index was 0.49 and 0.47 in Exp. I and II, respectively, while intercropped pea harvest index was 0.52 and 0.54 in Exp. I and II, respectively and on average for all N treatments.

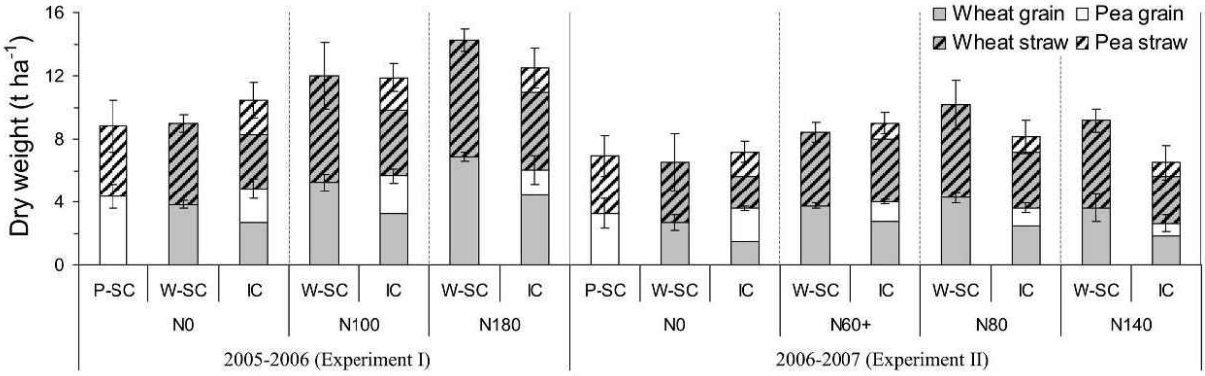


Figure 10 *Dry weight (t ha^{-1}) of sole crops (SC) and intercrops (IC) of pea (P) and wheat (W) for straw and grain for the different N treatments (Nx where 'x' represents N applied in kg N ha^{-1}). Values are means (n=3 to 5) ± standard error for grain and the whole dry weight.*

The sole cropped and intercropped wheat DW and yield were significantly ($p<0.10$) increased by fertilizer N in Exp. I (**Figure 10**). In Exp. II, sole cropped wheat DW and yield were significantly increased ($p<0.10$) from N0 to N80, while intercropped wheat DW and yield were highest in N60+ and clearly lowest in N0. For both experiments, intercropped pea DW and yield were significantly reduced with N fertilization ($p<0.10$), mostly when large amounts were applied (N180 in Exp. I and N140 in Exp. II). Thus, in Exp. I, total intercrop DW and yield were increased when fertilizer N was applied. In Exp. II, total intercrop DW and yield were the highest in N60+ and, surprisingly, the lowest in N140. Finally, wheat and pea sole crops DW and yield were always significantly higher ($p<0.10$) than their corresponding intercrop DW and yield, but seemed lower than the total intercrop DW and yield for treatments with little or no N fertilizer (N0, N60+ and N100). Conversely, increasing

the amount of fertilizer N (N180 in Exp. I, N80 and N140 in Exp. II), the sole cropped wheat produced significantly more DW and yield than the whole intercrop ($p<0.10$).

I.3.3.2. Dry weight and yield land equivalent ratios

LER values calculated from shoot biomass dry weight (DW) produced at harvest (LER_{DW}) were approximately 1 or more in all treatments ($p<0.05$) except for N180 where it was significantly ($p<0.05$) less than 1 (**Figure 9b**). This indicates that resources were used for DW production up to 17% more efficiently in intercrops than in sole crops in low-N conditions. On the whole, LER_{DW} values were reduced with increasing N fertilization, particularly for treatments N180 (Exp. I) and N140 (Exp. II). For all N treatments, wheat partial LER_{DW} values (LER_{DW-W}) were always above 0.5 ($p<0.05$) and not significantly different from 0.5 ($p>0.10$) for N0 and N140 in Exp. II. On the other hand, LER_{DW-P} values were always equal to or significantly below 0.5 ($p<0.05$).

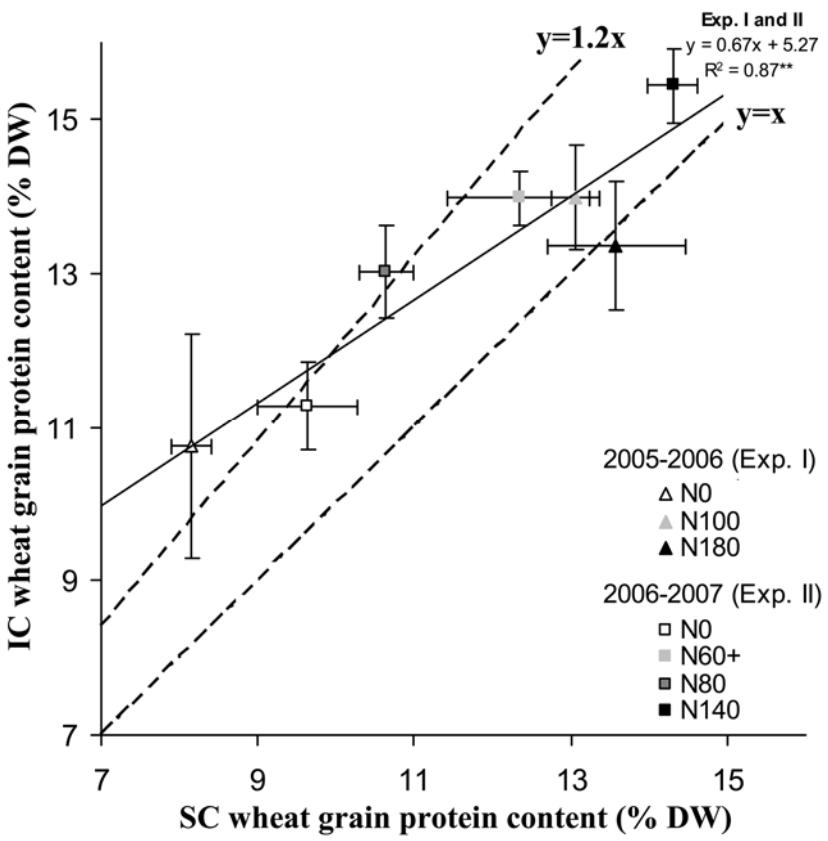


Figure 11 *Relationship between grain protein concentration (% of dry weight) of the intercropped (IC) wheat and sole cropped (SC) wheat for the different N treatments (Nx where 'x' represents N applied in kg N ha^{-1}) of Exp. I and II. A linear regression was fitted including all N treatments and experiments. Double asterisk (**) indicate that linear regression is significant at P=0.01. Values are means (n=3 to 5) ± standard error. The first bisector y=x and the regression y=1.2x are indicated in order to illustrate the increased range of grain protein concentration in IC compared with SC.*

LER_Y were 1.19, 1.17 and 1.01 for N0, N100 and N180, respectively in Exp. I and 1.19, 1.11, 0.92 and 0.75 for N0, N60+, N80 and N140, respectively in Exp. II (**Figure 9c**), indicating that resources were finally used more efficiently in intercrops for yield when little or no N fertilizer was applied. Partial LER_{Y-P} were 0.49 and 0.64 in N0 in Exp. I and II, respectively and only 0.36 and 0.23 for N180 and N140, respectively while partial LER_{Y-W} were always about 0.5 or more ($p<0.05$).

The advantage of intercrops over sole crops was greater for N accumulation than for yield or DW. Indeed, considering all the N treatments and experiments, LER values were 1.15 on average for LER_N, but only 1.02 and 1.05 for LER_{DW} and LER_Y, respectively. On average, wheat partial LER values were higher for N than for DW or yield (0.76, 0.63 and 0.62, respectively), while pea partial LER values were higher for yield (0.43) than for N (0.38) or DW (0.39).

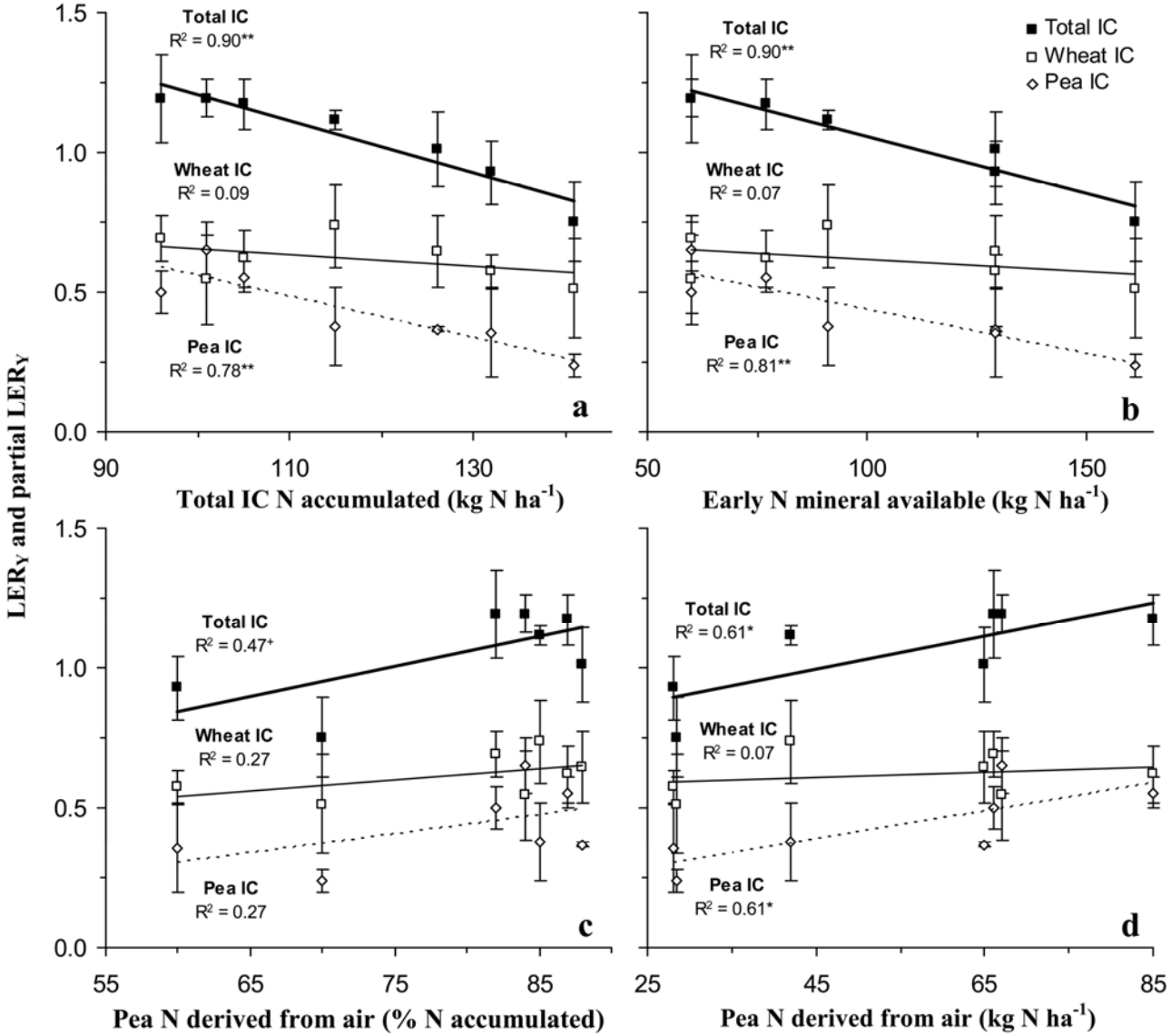


Figure 12 *Land equivalent ratio calculated from yield (LER_Y) of the total intercrop (Total IC) and partial LER_Y values of intercropped wheat (Wheat IC) and intercropped pea (Pea IC) as a function of (a) N accumulated by the whole intercrop at the beginning of pea flowering (BPF); (b) mineral N available until BPF (mineral N at sowing + N fertilization applied before BPF + N mineralized from humus and residues until BPF - N leaching until BPF); (c) the percentage of pea N derived from air at physiological maturity and (d) the amount of pea N accumulated from air at physiological maturity (QNdfa). Linear regressions were carried out for LER_Y, $LER_{Y\text{-}W}$ and $LER_{Y\text{-}P}$. Values are the mean (n=3 to 5) ± standard error. Single plus (+), single asterisk (*) and double asterisk (**) indicate that linear regression is significant at P=0.10, P=0.05 and P=0.01, respectively. LER values above 1 indicate that the intercrops are more efficient than the sole crops for grain yield and vice versa. Partial LER values below 0.5 indicate that species grain yield (per plant or row) is less in the mixture than in the sole crop (see* ***Chapter II, Part V*** *for details).*

I.3.3.3. Intercropping advantage for wheat grain protein concentration

Wheat grain protein concentration was on average 13% (Exp. I) and 15% (Exp. II) higher ($p<0.05$) in intercrops than in sole crops (**Figure 11**) except for N180 (Exp. I). On average for both experiments, the linear regression (**Figure 11**) indicates that the lower the sole crop grain protein concentration in N0, the greater was the increase in intercrop wheat grain protein concentration. Both sole cropped and intercropped wheat grain protein concentration were higher in N-fertilized plots compared with N0. The late split of N (N60+) in Exp. II resulted in a large increase in wheat grain protein concentration compared with N0 (28% in sole crop and 24% in intercrop) and a similar result was found for N140 in Exp. II (49% in sole crop and 37% in intercrop). On the other hand, the single early split of N (N80) in Exp. II had a small effect on wheat grain protein concentration compared with N0 (10% and 16% for sole cropped and intercropped wheat, respectively). In Exp. I, the increase in wheat grain protein concentration compared with N0 was about 64% and 27% for sole cropped and intercropped wheat, respectively on average for N100 and N180.

I.3.4. Functional relationships

LER values of intercrops for yield (LER_Y) were strongly negatively correlated ($p<0.01$) with N accumulated by the whole intercrop at the beginning of pea flowering (**Figure 12a**). This was mainly due to the significant reduction of partial LER_Y values of pea ($LER_{Y\text{-}P}$) with N accumulated by the intercrop ($p<0.01$), while partial LER_Y values of wheat ($LER_{Y\text{-}W}$) remained stable whatever the N accumulated by the whole intercrop ($p>0.10$). Similar results were found when plotting LER_Y and partial LER_Y values with mineral N available until BPF (**Figure 12b**). As an interesting result, the two regressions obtained in Figs 12a and 12b indicate that LER exceeded 1 when the N accumulated in intercrop or the early mineral-N available was less than 120 kg N ha^{-1}.

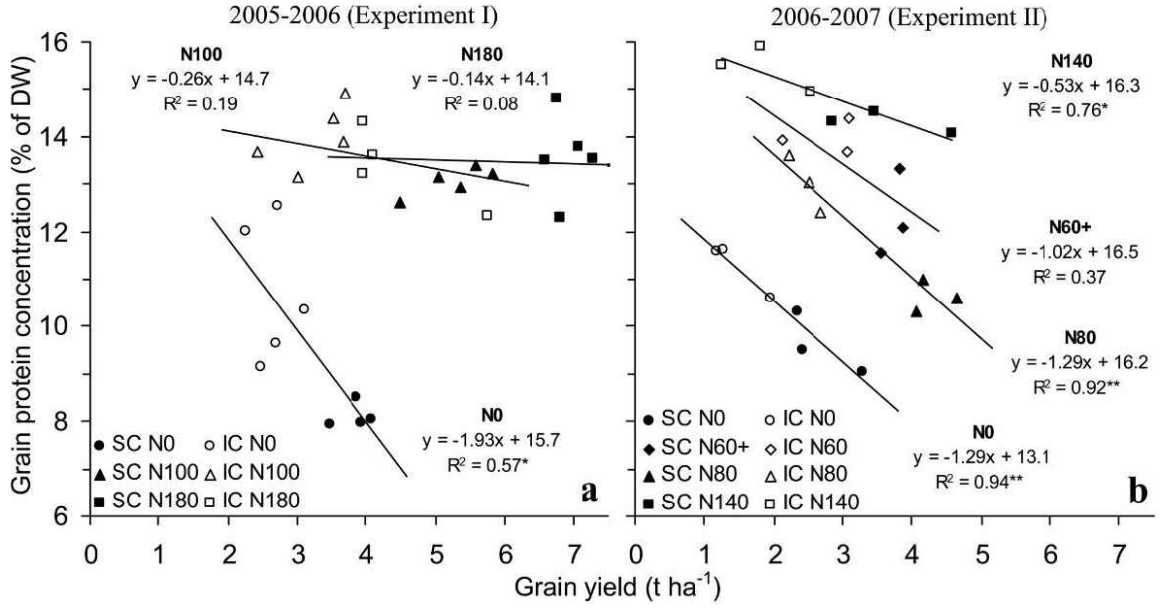


Figure 13 *Grain protein concentration of wheat (% of dry weight) as a function of the dry grain yield (t ha^{-1}) for sole cropped (SC) wheat (solid symbols) and intercropped (IC) wheat (open symbols) for the different N treatments (Nx where 'x' represents N applied in kg N ha^{-1}) for Experiment I (a) and Experiment II (b). Linear regressions were carried out for each N treatment, including both sole and intercropped treatments. Single plus (+), single asterisk (*) and double asterisk (**) indicate that linear regression is significant at P=0.10, P=0.05 and P=0.01, respectively.*

On the other hand, LER_Y was slightly positively correlated ($p<0.05$) with the percentage of plant N derived from N_2 fixation of the legume (**Figure 12c**) while LER_{Y-W} and LER_{Y-P} were not correlated with the %Ndfa ($p>0.10$). When considering the amount of atmospheric N acquired by pea (**Figure 12d**) a significant positive correlation was observed with LER_Y and LER_{Y-P} ($p<0.05$), but not for LER_{Y-W} ($p>0.10$).

Finally, for both experiments and all N treatments, there was a negative correlation between wheat yield and wheat grain protein concentration for a given N level (**Figure 13**). In Exp. I, correlations were highly significant for N0 ($p<0.05$) (**Figure 13a**), but not for the N-fertilized treatments ($p>0.10$). In Exp. II, correlations were significant for N0 ($p<0.01$), N80 ($p<0.01$) and N140 ($p<0.05$) (**Figure 13b**) and seemed to become weaker as N availability increased.

I.4 Discussion

I.4.1. N complementarity in intercrop

As expected, sole cropped wheat N accumulation was positively correlated with N availability (amount of soil mineral N and fertilizer N) and the intercropped wheat accumulated more than 50% as much N as the sole cropped wheat. This confirms that the cereal had access to a greater proportion of soil inorganic N when intercropped as compared with the sole cropping situation, supported by the increase in the percentage of plant N derived from N_2 fixation (%Ndfa) of pea which agrees with several other studies (e.g. Corre-Hellou 2005; Hauggaard-Nielsen et al. 2003; Corre-Hellou and Crozat 2005). Hence, due to the complementary use of N sources by intercrop components, N accumulated by the whole intercrop was only slightly affected by N fertilization.

The calculations of %Ndfa and the choice of reference crop must be analysed carefully (Shearer and Kohl 1986). In order to evaluate the quality of %Ndfa estimation, a sensitivity analysis of the calculation was carried out using i) a non-fixing pea, characterized by very low DW production and early physiological maturity, or ii) the intercropped wheat and iii) two stages of plant sampling. This analysis indicated that the $\delta^{15}N$ difference remained the same between intercropped and sole cropped pea and between stages. Thus the %Ndfa of the intercropped pea can be assumed to be always higher than that of the sole cropped pea even if absolute values of calculated %Ndfa are debateable. Indeed, we observed that the variability of $\delta^{15}N$ values within a crop stage was similar to that between stages for both wheat and pea in sole crops or intercrops due to i) soil heterogeneity over short distances, ii) crop dynamics and iii) variability in chemical analysis due to sampling. We can assume that the mean of the $\delta^{15}N$ values measured at the two stages (wheat flowering and wheat maturity for wheat and WF and pea maturity for pea) was a better estimate of the real value of crop $\delta^{15}N$ than when considering stages separately due to spatial heterogeneity and plant sampling bias, as recommended by some authors (e.g. Peoples et al. 2001).

A second critical point concerns the calculations of the pea %Ndfa in N-fertilized treatments considering intercropped wheat for the same treatment as the reference plant. This assumption means that wheat and pea used the same proportion of fertilizer-N and soil mineral N. This hypothesis is certainly debatable because of: i) the localization and dynamics of the fertilizer-N in the soil, ii) the interaction between soil mineral N content and symbiotic fixation, iii) soil heterogeneity and iv) differences in crop dynamics. Moreover, $\delta^{15}N$ of the N fertilizer is very important; it was -0.4 ± 0.1‰ in Exp. II which agrees with the decrease observed in the $\delta^{15}N$ values of wheat in N-fertilized treatments (N applied early) compared with N0. The $\delta^{15}N$ of the N fertilizer was not measured in Exp. I, but it must have been negative judging by the decrease in wheat $\delta^{15}N$ value in N-fertilized plots; an analysis of the

same type of fertilizer in the following year indicated a $\delta^{15}N$ value of -0.9 ± 0.1‰. This confirms that the ^{15}N natural abundance method is not very suitable when N fertilizer is applied, even though in our experiment the differences in calculated %Ndfa were in good agreement with the total N content of plants. A multi-enrichment technique using labelled ^{15}N application must therefore be carried out in these situations for obtaining a more precise estimate of legume %Ndfa (Salon C, pers. comm.).

Durum wheat – winter pea intercrops seems to be more efficient than sole crops to improve N use, particularly in low-N systems (Hauggaard-Nielsen et al. 2006), although some other results only showed a small benefit from intercrops (Jensen 1996; Andersen et al. 2004). In particular, intercrops seems more stable over the years than sole crops for N accumulation. Indeed, whatever the N treatments and experiments, N accumulated by the whole intercrop was less variable than by sole crops. Moreover, intercrops appeared more efficient than sole crops for the use of N sources due to the complementary use of soil mineral N and the increase in the %Ndfa of the intercropped pea when the soil mineral N content was low (<30 kg N ha^{-1} for 0-30 cm depth, in agreement with sole cropped pea results obtained by Voisin et al. (2002)) during early intercrop growth (until the booting stage of wheat). Indeed, N fertilization (80 kg N ha^{-1}) applied at the beginning of wheat stem elongation clearly lead to a decrease in %Ndfa (**Table 10**). However, when N fertilizer was applied later, at the 'visible flag leaf' wheat stage, corresponding to the beginning of pea grain filling, no reduction was observed in the %Ndfa. This is in keeping with: i) the strong decrease in N_2 fixation activity after the beginning of pea pod filling (Vocanson et al. 2005), ii) the slower N accumulation in later stages of growth (Vocanson et al. 2005) and iii) the increase in weevil damage on nodules observed in Exp. I, also noted by other authors (Corre-Hellou and Crozat 2004).

The complementary use of N sources by intercrop components was particularly efficient for the unfertilized treatment indicating that intercropping is well adapted to low-N-input systems. Moreover, the soil mineral N content at harvest was similar for the sole cropped wheat and the intercrops (**Table 9**), confirming that intercropping is as efficient as wheat in using soil mineral N. Finally, intercropping could reduce i) nitrate leaching compared to sole cropped pea due to its lower soil mineral N content at harvest and ii) gaseous N losses, by reducing the use of fertilizer N.

I.4.2. Intercropping production

The LER can be considered as an indicator of crops resource use for plant growth all over the growing season. In our experiments, resources (light, CO_2, water, nutrients and N) were used up to 17% more efficiently in intercrops than in sole crops for DW production in low-N conditions. Our results show that wheat took advantage of intercropping by using available resources more efficiently than pea, regardless of N availability. Moreover, wheat benefited from N fertilization indirectly by the increased growth of the wheat improving light and water captures ability and then suppressing pea growth (Ghaley et al. 2005).

The yield of wheat depends heavily on N supply as already observed for many cereals (e.g. Gate 1995; Jeuffroy and Bouchard 1999; Le Bail and Meynard 2003), and consequently N fertilization increased total grain yield of intercrops due to its strong effect on wheat yield, which exceeded the reduction in pea yield. Hence the yield of the whole intercrop was always at least to the same as that of the sole crops, except when a large amount of N was applied. LER values calculated from yield (LER_Y) indicates that resources were used up to 20% more efficiently for yield production in intercrops compared with sole crops when little or no N fertilizer was applied. The negative effect of N fertilization was mainly due to the reduction of pea shoot biomass, grain yield and N_2 fixation. This confirms that intercropping efficiency depends mostly on the complementary use of N between crops and the capacity of the legume to increase the rate of N_2 fixation (%Ndfa) for its N nutrition which is enhanced by the fact

that the advantage of intercrops compared with sole crops was greater for N accumulation than for yield.

I.4.3. Functional relationships

The intercrop efficiency for grain production was estimated by LER_Y and partial LER_Y values. LER_Y and $LER_{Y\text{-}P}$ were negatively correlated with N accumulated by the intercrop at the beginning of pea flowering. This indicates that, in our experiments, the final efficiency for yield of the whole intercrop and of the intercropped pea were already determined at the beginning of pea flowering even when N was applied later on and whatever the weather conditions from the beginning of pea flowering to harvest. This suggests that is possible to predict the final efficiency of the whole intercrop and of the intercropped pea at this stage. However, in order to manage the intercrops, it would be interesting to determine the final efficiency earlier than at the beginning of pea flowering. We hypothesized that N accumulated by the whole intercrop at beginning of pea flowering depends on mineral N available at beginning of pea flowering. This was confirmed by the similar relation observed when plotting LER_Y and partial LER_Y against early available N. However, this calculation assumes that apparent N-fertilizer-use efficiency was similar for the sole cropped and the intercropped wheat which seems reasonable since N-fertilizer-use efficiency depended mostly on the weather conditions when N fertilizer was applied which can lead to N losses by volatilization. It is well known that N-fertilizer-use efficiency also depends on crop N demand in relation to physiological stage and varies according to the crop growth rate (Limaux et al. 1999). However, we can assume that N demand of the whole intercrop and of the intercropped wheat were fairly similar in early stages due to row intercropping where plant competition would be almost the same within the row in sole crops and intercrops until stem elongation. Hence, our results confirm that early available N strongly determines the performance of the intercropped pea and of the whole intercrop in comparison with sole cropping situation, but does not significantly modify the growth of intercropped wheat. These results are in keeping with the fact that intercropping efficiency, estimated for total grain production (LER_Y), was increased when the %Ndfa of pea increased and more specifically when the amount of N derived from air was increased. As a first estimate, in our conditions, early mineral N available or N accumulated in intercrops at beginning of pea flowering must be lower than 120 kg N ha^{-1} to observe an advantage for yield.

It is well known that wheat grain protein concentration depends not only on the amount of N fertilizer but also on N splitting (e.g. Gate 1995), partly due to smaller N losses (Limaux et al. 1999). This was confirmed by the late split of N (N60+ treatment) in Exp. II which resulted in a large increase in wheat grain protein concentration for both sole crops and intercrops. It has been demonstrated by many authors over the last two decades that for sole wheat crops, yield and grain protein concentration are negatively linearly correlated (e.g. Gate 1995). This was confirmed by the negative correlation between wheat yield and wheat grain protein concentration for a given N level, in particular for low N supplies. This result was also observed for the intercropped wheat. Moreover, as N availability increased the correlation became weaker, indicating that N was not a very limiting resource when a large amount of N was applied. As a consequence, it is likely that the higher grain protein concentration in intercropped wheat than in sole cropped wheat can be mainly explained by the reduction in intercropped wheat yield, which was about 40% lower than that of wheat sole crop. However, it must be assumed that wheat grain protein concentration depends on the interaction with N availability. Indeed, only 15% of the N absorbed by the intercropped pea is unavailable for the intercropped wheat which in our conditions represented only ca. 10 kg N ha^{-1} on average for both experiments and all N treatments. It seems also that the N dynamics were altered in intercrops because of the changes in the timing of N_2 fixation of the legume. Moreover, intercrop certainly allowed a better synchrony of wheat N demand and supply due to the changes in wheat growth as a consequence of inter- and intraspecific

competition, certainly leading to a reduced number of ears per square metre for the intercropped wheat. Finally, the wheat grain protein concentration was significantly higher in intercrops than in sole crops, because a larger amount of N was remobilized by each plant and ear due to: i) fewer wheat plants, ears and grains per unit area, but ii) with only slightly less available soil N per square metre than for sole crops, so that more N was available for each grain of wheat.

I.5 Concluding remarks

Our results confirm that intercropping is more suited to low-N-input systems than to conventional highly fertilized systems. When N fertilizer is applied, the intercropped legume growth and yield were significantly reduced, while wheat was only slightly affected. On the other hand, when there was a shortage of N during early growth, e.g. when little or no fertilizer was applied late to preceding crops, leaving low residual mineral N, there was a marked complementarity between species, in particular for N acquisition. Intercropping efficiency for N use was greatest with low N availability, due to greater N uptake by wheat. This clearly allowed better wheat grain filling due to: i) the high pea N_2 fixation rate in intercrop, making available for the intercropped wheat almost as much soil mineral N per square meter as in the sole crop, ii) fewer wheat plants, ears and grains per unit area in intercrops compared with sole crops and hence iii) a higher efficiency of the cereal to recover N. Our results show that N fertilization of intercrops must be carried out after the end of pea flowering to prevent an adverse effect on N_2 fixation. Moreover when the N fertilization occurs after the end of wheat stem elongation (at the booting stage), the N taken up will be largely remobilized to the grain, causing a significant increase in grain protein concentration.

Our results must also be related to the species complementarity due to differences in their phenology and physiology. It can be postulated that if there are significant complementarities between the crops for the use of natural resources, particularly N, the optimum N fertilization level for the intercrops is probably lower than that of the average of the individual sole crop. This implies that intercropping may be advantageous when little or no N fertilizer is applied due to a high degree of complementary N use between the two species. Such results have been reported for several cereal – legume intercrops grown in arid, semi-arid, tropical and temperate climates (Fujita et al. 1992; Ofori and Stern 1987; Jensen 1996).

Finally, our results confirm that intercropping is a good way to improve the efficiency of N use in agroecosystems, particularly those with a low N availability, because of i) the increase in wheat grain quality, ii) the increase of free atmospheric N input through N_2 fixation and iii) the potential reduction of N leaching after legumes. We believe that it is important to investigate the interspecies dynamics that shape the final outcome of intercropping and more precisely inter- and intraspecific competition throughout the whole growing period. This may reveal dynamics in competition, which is critical to determine when the advantage of intercrop begins. Later on, this will be helpful to optimize these innovative agroecosystems, in particular for the choice of durum wheat and pea cultivar traits suited to intercropping, the ideal proportions of species and N fertilization management.

II. L'efficacité de l'association blé dur – féverole d'hiver pour améliorer le rendement et la teneur en protéines du blé dur dépend de la densité des espèces.

Ce chapitre sera soumis à European Journal of Agronomy ou Field Crops Research après traduction en anglais.

Résumé

La féverole d'hiver – potentiellement moins sensible aux bio-agresseurs et à la verse que le pois d'hiver – pourrait être mieux adaptée pour les associations d'espèces avec le blé dur et en particulier en agriculture biologique. Le but de notre étude était double : i) vérifier si cette association permettait d'améliorer le rendement relatif et la teneur en protéines du blé dur en situation à bas niveaux d'intrants azotés et ii) évaluer l'effet des densités des espèces et des structures de couvert sur le fonctionnement de l'association. Une expérimentation a été réalisée au cours de trois années dans le Sud-Ouest de la France avec différents densités, fertilisations azotées et cultivars de blé dur (*Triticum turgidum* L.) et de la féverole d'hiver (*Vicia faba* L., cv. Castel) cultivés seuls ou en association substitutive en rang. Nos résultats ont permis de montrer que les associations blé dur – féverole d'hiver pouvaient améliorer le rendement jusqu'à 18% comparativement aux cultures « pures » et jusqu'à 32% pour l'azote accumulé. Ces associations permettent également d'accroître la teneur en protéines du blé dur par : i) une réduction du rendement et ii) une disponibilité en azote quasi similaire aux cultures « pures » grâce à un niveau de fixation symbiotique de la légumineuse plus élevé en association (81% contre 62% en culture « pure »). La performance de ces associations a été d'autant plus forte que la densité de la féverole d'hiver n'est pas trop importante (environ 12 plantes m^{-2}) et que celle du blé dur n'est pas trop faible (au moins 110 plantes m^{-2} semblent nécessaires). La structure du couvert doit être raisonnée de façon à accroître les compétitions intraspécifiques de la féverole d'hiver en augmentant la densité sur le rang et en réduisant les compétitions interspécifiques en espaçant suffisamment les rangs de féverole d'hiver (60 cm). En dehors de ces conditions, l'accroissement des compétitions pour la lumière, en lien avec une hauteur et une biomasse de la légumineuse supérieures à celles du blé dur se traduisent par une forte réduction de la biomasse et du rendement du blé dur.

II.1 Introduction

Les associations blé dur – pois d'hiver permettent d'améliorer le rendement relatif et la teneur en protéines du blé dur comparativement aux cultures monospécifiques « pures » (Bedoussac et Justes 2009, **Chapitre III, Part I**) et l'avantage de ces système est accru dans les situations sans ou à bas niveau d'intrants azotés. Le pois protéagineux d'hiver est une culture nécessitant souvent le recours à l'utilisation de plusieurs pesticides. En effet, elle est sensible à l'anthracnose ce qui peut entraîner la verse de la culture en fin de cycle et rendre sa récolte difficile. Elle est également peu compétitive vis-à-vis des adventices et sensible à de nombreux ravageurs parmi lesquels les pucerons et les sitones. La féverole d'hiver – potentiellement moins sensible aux bio-agresseurs et à la verse – semblerait donc une alternative à privilégier et en particulier en agriculture biologique et dans les systèmes à bas intrant.

Cependant, il existe peu de références bibliographiques et techniques sur cette culture car elle est souvent considérée comme une légumineuse à graines secondaire. Les références sont encore plus spartiates en association en particulier sur l'effet de la densité de plantes et les structures de couverts à mettre en place en mélange avec une céréale. Or, il a été montré que l'augmentation de la densité des plantes accroîtrait les compétitions entre les composantes de l'association (Willey et Osiru 1972) ce qui, comme l'a noté Willey (1979a,b), favoriserait l'espèce dominante. Par ailleurs, la structure des associations modifie le partage du rayonnement, et en particulier la quantité de lumière transmise à la plus petite des deux espèces, mais également les compétitions interspécifiques vis-à-vis de l'eau et des nutriments. Mohta et De (1980) ont montré dans le cas d'associations maïs – soja et sorgho – soja que les rendements du maïs et du sorgho étaient similaires dès lors que les mélanges consistaient en l'alternance d'un rang de céréale et d'un rang de légumineuse (1x1) ou de deux rangs de chaque espèce (2x2). Par contre ces auteurs ont observé que le rendement du soja était supérieur dans les situations 2x2 par rapport aux associations 1x1. Par conséquent le choix de la densité de semis à laquelle chaque espèce doit être semée dans le mélange ainsi que la structure du mélange semblent être des éléments clés de la performance des associations et doivent être correctement raisonnés de façon à optimiser ces systèmes plurispécifiques.

Le but de cette étude a été d'évaluer la performance des associations blé dur – féverole d'hiver relativement aux cultures monospécifiques en considérant différentes variétés de blé dur, disponibilités en azote, densités de semis et structures de couvert. Pour ce faire nous avons analysé : i) l'utilisation des ressources en N, ii) la production dynamique des cultures et leur hauteur, iii) l'avantage potentiel des associations pour le rendement, la matière sèche, l'azote accumulé et la teneur en protéines des grains et iv) les relations fonctionnelles liant la production des cultures en association à leur densité et ceci de façon à mieux comprendre les processus clés de leur performance.

II.2 Matériels et méthodes

II.2.1. Protocoles expérimentaux

Les expérimentations ont été réalisées sur les parcelles expérimentales de l'Institut National de la Recherche Agronomique à Auzeville en 2005-2006 et 2006-2007 et sur celles du Lycée agricole d'Auzeville en 2007-2008. Les données climatiques et les caractéristiques des sols sont décrites en détails dans le **Chapitre II, Partie IV**.

Année	Culture	Structure du couvert	Variétés	Densité semis (grains m^{-2})	Densité observée (plante m^{-2})	Traitement semences	Desherbage	Insecticide	Fongicide	Répétitions par traitement azoté (Nx avec 'x' la quantité d'azote en kg N ha^{-1})
2005-2006	Blé pur	BBBBBBBBBBB	Nefer	336	226	Oui	Chimique	Non	Oui (x1)	4 (N0) ; 5 (N100)
	Féverole pure	F F F F F F	Castel	30	26	Oui	Chimique	Oui (x2)	Oui (x1)	3 (N0)
	Associaition	BFB BFB BFB	Nefer / Castel	168 / 15	112 / 13	Oui	Chimique	Oui (x2)	Oui (x1)	3 (N0) ; 3 (N100)
2006-2007	Blé pur	BBBBBBBBBBB	Nefer	336	203	Oui	Chimique	Non	Oui (x2)	4 (N0) ; 3 (N60, N80 et N140)
			Neodur	336	186	Oui	Chimique	Non	Oui (x2)	4 (N0) ; 3 (N60, N80 et N140)
			Acalou	336	170	Oui	Chimique	Non	Oui (x2)	4 (N0) ; 3 (N60, N80 et N140)
			Orjaune	336	227	Oui	Chimique	Non	Oui (x2)	4 (N0) ; 3 (N60, N80 et N140)
	Féverole pure	FFFFFFFFFFF	Castel	30	46	Oui	Chimique	Non	Oui (x2)	7 (N0)
	Association	BFBFBFBFBFB	Nefer / Castel	168 / 15	101 / 23	Oui	Chimique	Non	Oui (x2)	4 (N0) ; 3 (N60, N80 et N140)
			Neodur / Castel	168 / 15	93 / 23	Oui	Chimique	Non	Oui (x2)	4 (N0) ; 3 (N60, N80 et N140)
			Acalou / Castel	168 / 15	84 / 23	Oui	Chimique	Non	Oui (x2)	4 (N0) ; 3 (N60, N80 et N140)
			Orjaune / Castel	168 / 15	112 / 23	Oui	Chimique	Non	Oui (x2)	4 (N0) ; 3 (N60, N80 et N140)
2007-2008	Blé pur	BBBBBBBBBBB L1823	L1823-N75P2	336	239	Oui	Chimique	Non	Oui (x2)	3 (N75)
			L1823-N0AB*	420	125	Non	Herse Etrille x2	Non	Non	6 (N0)
	Féverole pure	F F F F F F Castel	F-N0P1	30	24	Oui	Chimique	Non	Non	6 (N0)
			F-N0AB*	37	25	Non	Herse Etrille x2	Non	Non	6 (N0)
	Association	BFB BFB BFB L1823 / Castel	ICF-L1823-N0P1	168 / 15	119 / 12	Oui	Chimique	Non	Non	3 (N0)
			ICF-L1823-N0AB*	210 / 18	59 / 12	Non	Herse Etrille x2	Non	Non	9 (N0)

Tableau 11 *Description des traitements expérimentaux considérés : année, culture, structure du couvert, variétés, densités espérées et observées, traitement de semence, désherbage, insecticide, fongicide et nombre de répétitions par traitements azotés.*

Dans chaque expérimentation nous avons comparé : i) le blé dur (*Triticum turgidum* L.) cultivé seul à une densité de semis de 336 grains m^{-2}, ii) la féverole d'hiver (*Vicia faba* L., cv. Castel) cultivée seule à une densité de semis de 30 grains m^{-2} et iii) l'association blé dur – féverole d'hiver où chaque espèce a été semée à une densité égale à la moitié de celle des cultures « pures ». A l'exception de la culture « pure » de féverole d'hiver – toujours cultivée sans fertilisation azotée – différents traitements azotés ont été comparés lors des trois expérimentations.

En 2005-2006, un seul cultivar de blé dur a été utilisé : Nefer (Nf). Deux niveaux de fertilisation azotée (N0 et N100) ont été évalués sur les cultures « pures » de blé dur et les associations voir **Chapitre II, Partie II** pour plus de détails. Les cultures ont été désherbées en prélevée à l'aide d'un mélange de Linuron (1000g ha^{-1}) et Trifluraline (1200 g ha^{-1}). Deux traitements insecticides (Lambda-cyhalothrine 6.25 g ha^{-1} et Tau-fluvalinate 48 g ha^{-1}) sur la féverole d'hiver « pure » et les associations et un traitement fongicide (Metconazole 72 g ha^{-1}) sur l'ensemble des cultures ont été réalisés.

En 2006-2007, quatre cultivars de blé dur ont été évalués : Acalou (Ac), Nefer (Nf), Neodur (Nd) et Orjaune (Oj). Quatre traitements azotés ont été comparés sur les cultures « pures » de blé dur et les associations (N0, N60, N80 et N140 voir **Chapitre II, Partie II** pour plus de détails). Les cultures ont été désherbées en prélevée à l'aide d'un mélange de Trifluraline (900 g ha^{-1}) et Linuron (450 g ha^{-1}). Deux traitements fongicides (Metconazole à 90 g ha^{-1}) ont été appliqués sur l'ensemble des cultures mais aucun insecticide.

En 2007-2008, la lignée de blé dur L1823 actuellement en cours de sélection (lignée à paille haute) a été utilisée. Les cultures ont été évaluées sans fertilisation azotée (N0) et une fertilisation azotée limitée de 75 kg N ha^{-1} (40 kg N ha^{-1} au stade épi 1cm du blé dur et 35 kg N ha^{-1} au stade gonflement du blé dur) a également été évalué sur le blé dur « pur ». Les cultures ont été désherbées en prélevée à l'aide d'un mélange de Trifluraline (900 g ha^{-1}) et Linuron (450 g ha^{-1}) à l'exception des traitements sans intrant (N0AB*) pour lesquels le désherbage a été réalisé au moyen de deux passages de herse étrille. La culture « pure » de blé dur N75P2 a reçu deux traitements fongicides, un premier à base de Fenpropimorphe (375 g ha^{-1}) et d'Epoxiconazole (126 g ha^{-1}) et un second au moyen de Metconazole (90 g ha^{-1}). Les associations blé dur – féverole d'hiver et les cultures « pures » de féverole d'hiver n'ont pas reçu de traitement en végétation.

Les féveroles d'hiver « pures » ont été semées en 6 rangs espacés de 29 cm en 2005-2006 et 2007-2008. Par contre en 2006-2007 elles ont été semées en 11 rangs espacés de 14.5 cm tout comme l'ont été les cultures « pures » de blé dur lors des trois expérimentations. En 2005-2006 et 2007-2008 les associations blé dur – féverole d'hiver étaient composées de 6 rangs de blé dur espacés de 29 cm et de 3 rangs de féverole d'hiver espacés de 58 cm. Par contre en 2006-2007, les associations étaient faites de 6 rangs de blé dur espacés de 29 cm alternés avec 5 rangs de féverole d'hiver espacés également de 29 cm. Nous avons utilisé des semences traitées sauf dans le cas des cultures sans intrant (N0AB*) en 2007-2008 qui ont donc été semées à une densité de 25% supérieure. Par ailleurs, 20 mm d'irrigation ont été apportés au semis en 2006-2007 en raison d'un teneur en eau dans le sol faible et ce de façon à avoir une levée homogène sur les différents traitements.

Les expérimentations ont été réalisées en split-plot avec les traitements azotés en bloc principaux et les cultures en sous bloc. Les plans expérimentaux sont décrits dans le détail en **Annexes I, II et III** pour les 3 années successivement. Les différents traitements expérimentaux, les notations utilisées, les densités observées ainsi que le nombre de répétitions sont récapitulés dans le **Tableau 11** ci-dessus. On remarquera que le nombre de répétitions varie de 3 à 9 selon les traitements et les expérimentations. En particulier nous avons plus de répétitions pour le blé dur seul en 2005-2006 que pour les associations et la

féverole d'hiver « pure ». Ce choix se justifie par le fait que des prélèvements dynamiques ont été réalisés sur le blé dur « pur » afin de le comparer aux associations blé dur – pois d'hiver qui étaient pour nous la référence alors que les associations avec la féverole d'hiver n'ont pas été suivies en dynamique du fait qu'il s'agissait d'abord d'en évaluer le potentiel. En 2006-2007, le nombre de répétitions est supérieur pour la féverole d'hiver « pure » car celle-ci n'a été cultivée que sans fertilisation azotée et il était important de se prévenir d'une mauvaise levée ou d'un accident quelconque pendant la culture en augmentant le nombre de répétitions. Enfin, en 2007-2008 le nombre de répétitions est maximal pour l'association N0AB* qui a été suivie en dynamique et qui est l'objet principal de notre étude. A contrario nous n'avons que 3 répétitions pour l'association N0P1 qui à l'origine devait servir de parcelle de réglage mais qui finalement a été conservée en raison de la différence de levée du blé dur par rapport à l'association N0AB*. Enfin il n'y a que 3 répétitions pour le blé dur N75P2 car celui ne sert pas directement à l'évaluation de la performance des associations. Voir **Chapitre II, Partie V** pour plus de détails sur les analyses statistiques.

II.2.2. Mesures et analyses

En 2006-2007 et 2007-2008 quatre prélèvements ont été réalisés au cours des cycles végétatifs aux stades épi 1cm du blé dur (716 et 836 °C j^{-1} après la levée du blé dur (ALB) respectivement), au début de la floraison de la féverole d'hiver (1281 et 1159 °C j^{-1} ALB respectivement), à la floraison du blé dur (1746 et 1625 °C j^{-1} ALB respectivement) et à la maturité physiologique du blé dur coïncidant avec celle de la féverole d'hiver (2824 et 2741 °C j^{-1} ALB respectivement). En 2006-2007 un cinquième prélèvement a été réalisé pendant la phase de tallage du blé dur à 505 °C j^{-1} ALB.

II.2.3. Calculs

II.2.3.1. Calcul de la fixation symbiotique de la féverole d'hiver

Le taux de fixation symbiotique (%Ndfa pour Percentage of Nitrogen Derived From Air en anglais) des légumineuses en association et en culture « pure » a été calculé par la méthode de l'abondance naturelle ^{15}N (Amarger et al. 1979 ; Unkovich et al. 2008) voir **Chapitre III, Partie I** pour plus de détails. Cette méthode intègre un facteur de correction β correspondant au $\delta^{15}N$ d'une légumineuse qui n'aurait accès qu'au N_2 de l'air que l'on considère être, pour la féverole d'hiver, identique à celui du pois d'hiver à savoir -1‰ (Voisin et al. 2002). Nous avons utilisé cette référence car celles trouvées dans la bibliographie pour la fèverole étaient assez variables. Pour avoir une mesure correcte, il aurait donc été nécessaire de mesurer expérimentalement le facteur de correction β. Faute de mesure du $\delta^{15}N$ du blé dur dans les associations blé dur – féverole d'hiver, nous avons choisi d'utiliser comme valeur de référence celles utilisées dans le cas du calcul de la fixation symbiotique du pois d'hiver (cf. **Chapitre III, Partie I**). Nous faisons l'hypothèse que ces valeurs de référence sont représentatives du $\delta^{15}N$ du sol et dépendent plus de la variabilité spatiale que de la culture. Il est ainsi possible que la valeur calculée du taux de fixation symbiotique ne soit pas correcte (sur ou sous-estimée) mais la comparaison entre traitements SC et IC devrait être satisfaisante. En 2007-2008, nous avons utilisé comme valeur de référence les mesures faites sur le blé dur associé N0AB* pour calculer le taux de fixation de la féverole d'hiver en culture « pure » et en association en faisant l'hypothèse que ces traitements n'ayant pas reçu de fertilisation azotée ont *a priori* des valeurs identiques de $\delta^{15}N$ du sol.

II.2.3.2. Calcul des Land Equivalent Ratio

Le LER correspond à la surface qu'il faudrait en cultures « pures » pour produire le rendement, la matière sèche ou l'azote accumulé de l'association (Willey 1979a). Le LER pour une association blé dur – féverole d'hiver est la somme des LER partiels du blé dur

(LER_{BD}) et de la féverole d'hiver (LER_F) d'après De Wit et Van Den Bergh (1965) voir **Chapitre II, Partie V** pour plus de détails. Nous avons pris comme référence le blé dur « pur » ayant reçu la même fertilisation azotée que les cultures « pures » et bien entendu le même cultivar.

Par contre, nous avons toujours considéré la féverole d'hiver « pure » non fertilisée comme référence en faisant l'hypothèse que l'N n'est pas une ressource limitante pour la légumineuse et n'affecte donc pas sa matière sèche, ni son rendement ni sa quantité d'azote accumulé. Enfin, en 2007-2008 les LER pour l'association N0P1 ont été calculés en considérant comme référence la féverole d'hiver « pure » N0P1 et le blé dur « pur » N0AB* et ceci en l'absence de référence blé dur N0P1. Par conséquent, il est probable que les valeurs de LER calculées soient légèrement surestimées puisque l'on peut penser que la matière sèche, le rendement et l'azote accumulé par le blé dur L1823-N0P1 soit supérieur à celui du blé dur n'ayant eu aucun intrant (N0AB*) en raison d'une densité de plantes supérieure dû au traitement de semence.

II.3 Résultats

II.3.1. Complémentarité pour l'azote dans les associations blé dur – féverole d'hiver

II.3.1.1. Accumulation de l'azote dans les parties aériennes

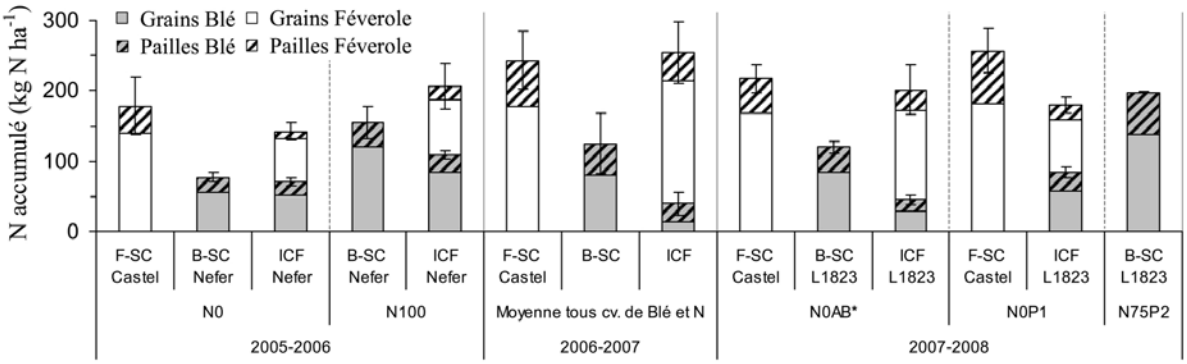


Figure 14 *Azote accumulé (kg N ha^{-1}) dans les pailles et les grains de la féverole d'hiver (F) et du blé dur (B) en culture « pure » (SC) et en association (IC) pour les différentes expérimentations et traitements. Les valeurs sont la moyenne de n=3 à 5 ± écart type calculé sur l'azote total accumulé (pailles + grains) par le blé dur et par la féverole d'hiver.*

La quantité d'azote accumulée par l'association (ou IC pour intercrop en anglais) blé dur – féverole d'hiver est toujours significativement supérieure à celle du blé dur cultivé seul (ou culture « pure », ou culture monospécifique ou SC pour sole crop en anglais) et ayant reçu le même niveau de fertilisation (**Figure 14**). En 2007-2008, aucune différence n'a été mise en évidence entre le blé dur fertilisé (N75P2) et les associations non fertilisées (N0AB* et N0P1). La quantité d'azote accumulée par la féverole d'hiver seule est quant à elle toujours supérieure à celle du blé dur « pur » et le plus souvent supérieure ou égale à celle de l'association. En 2005-2006, en présence de fertilisation (N100) l'association a accumulé une quantité d'azote plus importante que la féverole d'hiver seule non fertilisée. Cet apport d'azote (N100) a par ailleurs permis d'augmenter significativement (+78 kg N ha^{-1}) la quantité d'azote accumulée par le blé dur seul comparativement au traitement N0. Dans une moindre mesure, cet apport d'azote a aussi permis d'accroître la quantité d'azote absorbée par le blé dur et la féverole d'hiver en culture associée (+37 et +27 kg N ha^{-1} respectivement) par

rapport à N0. En 2006-2007, en moyenne pour tous les traitements azotés (N0, N60, N80 et N140) et tous les cultivars de blé dur (Nefer, Neodur, Acalou et Orjaune), on observe que la quantité d'azote accumulée par l'association provient à 85% de la féverole d'hiver. Il en est de même en 2007-2008 en N0AB* où la féverole d'hiver représente 77% de l'azote accumulé par l'association contre seulement 53% en N0P1 (avec l'utilisation de semences traitées).

II.3.1.2. Fixation symbiotique de la féverole d'hiver

Le **Tableau 12** récapitule les $\delta^{15}N$ mesurés pour la féverole d'hiver, les $\delta^{15}N$ de références utilisés pour le calcul de la fixation symbiotique, les taux de fixation (%Ndfa) et les quantités d'azote accumulées issues de la fixation symbiotique (QNdfa) de la féverole d'hiver cultivée seule (SC) ou en association (IC). On observe qu'à l'exception de la féverole d'hiver associée en N140 (Exp. II), le taux de fixation de la féverole d'hiver en culture « pure » est toujours inférieur à celui de la féverole d'hiver en association (65% vs 85% en 2005-2006 ; 64% vs 74% en 2006-2007 et 60% vs 77% en 2007-2008) (**Tableau 12**). On observe par ailleurs que la fertilisation azotée en culture associée n'a pas eu d'effet sur le taux de fixation symbiotique de la légumineuse en 2005-2006, ce qui n'a pas été le cas en 2006-2007. En effet, lors de cette seconde expérimentation, l'apport précoce d'azote (N80 et N140) a induit une réduction de la fixation symbiotique comparativement aux traitements N0 et N60.

Data	Crop		2005-2006 (Exp. I)		2006-2007 (Exp. II)				2007-2008 (Exp. III)	
			N0	N100	N0	N60	N80	N140	N0AB*	N0P1
δ15N	Wheat		4.9 ± 0.6	2.3 ± 0.8	2.5 ± 0.4	2.7 ± 0.6	1.2 ± 0.4	1.0 ± 0.6	3.1 ± 0.9	
	Féverole	IC	-0.3 ± 0.1	-0.4 ± 0.1	-0.2 ± 0.1	-0.2 ± 0.1	-0.2 ± 0.1	0.2 ± 0.4	-0.1 ± 0.1	
		SC	1.0 ± 0.0		0.3 ± 0.4				0.7 ± 0.6	0.6 ± 0.2
%Ndfa	Féverole	IC	88 ± 3	82 ± 2	79 ± 3	79 ± 3	64 ± 5	38 ± 20	77 ± 3	
		SC	65 ± 1		64 ± 11				58 ± 14	62 ± 6
QNdfa	Féverole	IC	62 ± 12	79 ± 25	174 ± 31	170 ± 38	153 ± 24	82 ± 48	117 ± 36	
		SC	116 ± 26		161 ± 10				125 ± 27	147 ± 16

Tableau 12 *Pour les différentes expérimentations et traitements : i) excès isotopique ^{15}N ($\delta^{15}N$) du blé dur en association (plante référence pour le calcul de la fixation symbiotique) et de la féverole d'hiver en culture « pure » (SC) et en association (IC) mesuré à la récolte, ii) pourcentage de l'azote accumulé par la féverole d'hiver en SC et IC issu de la fixation symbiotique (%Ndfa) et iii) quantité d'azote provenant de la fixation symbiotique (QNdfa). Les valeurs correspondent à la moyenne ± écart type.*

II.3.1.3. Land equivalent ratio pour l'azote accumulé

Les valeurs de LER calculées à partir de l'azote accumulé dans les parties aériennes (LER_N) sont toujours supérieures à 1 (**Figure 15**) indiquant un avantage de l'association blé dur – féverole d'hiver pour l'acquisition de l'azote comparativement aux cultures « pures » respectives. Les LER_N partiels du blé dur et de la féverole d'hiver dépendent fortement de l'expérimentation. On observe qu'en moyenne les LER_N partiels du blé dur ont été supérieurs à 0.5 et ceux de la féverole d'hiver inférieurs ou égaux à 0.5 en 2005-2006 et 2007-2008 (N0P1) alors que les LER_N partiels du blé dur ont été inférieurs à 0.5 et ceux de la féverole d'hiver supérieurs à 0.5 en 2006-2007 et 2007-2008 (N0AB*).

On remarque par ailleurs qu'en 2005-2006 l'apport d'azote (N100) s'est traduit par une diminution du LER_N partiel du blé dur comparativement à N0 (0.93 et 0.70 respectivement) et par une augmentation du LER_N partiel de la féverole d'hiver (0.39 et 0.54 respectivement). En 2006-2007, en moyenne pour les quatre cultivars de blé dur, nous n'avons pas observé d'effet significatif des traitements azotés sur les LER_N (total et partiels) bien que les LER_N totaux semblent inférieurs en N0 et N140 comparativement à N60 et N80 (1.12 et 1.29 respectivement pour les deux groupes). De même, en moyenne pour les quatre niveaux

de fertilisation, le cultivar de blé dur n'a pas eu d'effet sur les LER_N totaux et partiels à l'exception de l'association avec le cultivar Orjaune (Oj) pour laquelle le LER_N total était inférieur à celui des autres cultivars (1.08 contre 1.24). Enfin, en 2007-2008, le LER_N total a été identique en N0AB* et N0P1 mais les LER_N partiels de la féverole d'hiver et du blé dur ont été respectivement diminués et augmentés en N0P1 comparativement à N0AB*.

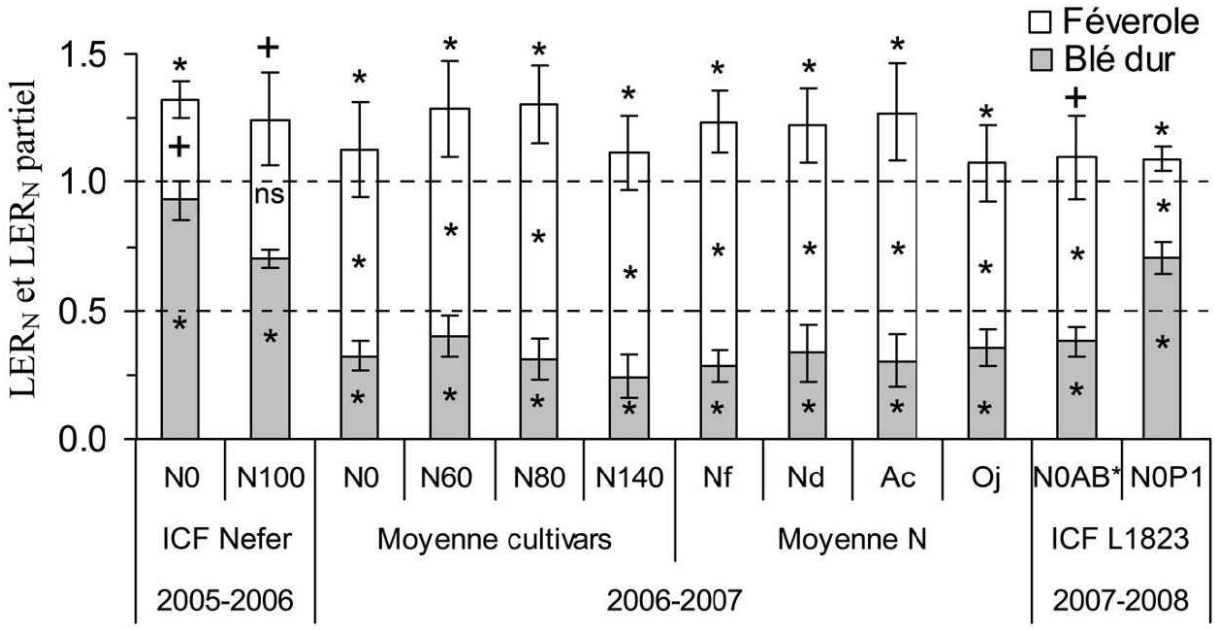


Figure 15 *Land equivalent ratio partiels (LER) du blé dur et de la féverole d'hiver calculés à partir de l'azote accumulé (LER_N) pour les différentes expérimentations et traitements. Les valeurs sont la moyenne de n=3 à 5 ± écart type. Les symboles (+) et (*) au dessus des barres indiquent que les valeurs de LER sont significativement différentes de 1 à P<0.10 et P<0.05 respectivement. Les symboles (+) et (*) dans les barres indiquent que les valeurs de LER partiels (du blé dur et de la féverole d'hiver) sont significativement différentes de 0.5 à P<0.10 et P<0.05 respectivement. 'ns' indique que les valeurs sont non significatives (P>0.10). Une valeur de LER supérieure à 1 indique que l'association est plus efficace que les cultures pures du point de vue de l'azote accumulé et vice versa. Une valeur de LER partiel inférieure à 0.5 indique que l'azote accumulé par une espèce (par plante ou par rang) est inférieur dans l'association par rapport à la culture « pure » (voir* ***Chapitre II, Partie V*** *pour plus de détails).*

II.3.2. Matière sèche, rendement et land equivalent ratio

II.3.2.1. Matière sèche et rendement

Nos résultats confirment que le rendement et la matière sèche des composantes de l'association dépendent fortement de l'expérimentation (**Figure 16**). En moyenne les indices de récolte de la féverole d'hiver sont de 0.46 et ceux du blé dur de 0.44 à l'exception de l'association en 2006-2007 où ils étaient de seulement 0.15 (en moyenne pour tous les niveaux d'azote et les cultivars de blé dur). En 2005-2006, l'indice de récolte du blé dur associé était supérieur à celui du blé dur « pur » (0.48 vs. 0.43) et inférieur en 2007-2008 (0.41 vs. 0.44). L'indice de récolte de la féverole d'hiver associée est quant à lui toujours supérieur à celui de la culture « pure » quelle que soit l'expérimentation (0.49 vs. 0.43 en moyenne).

En 2005-2006, la matière sèche et le rendement du blé dur « pur » ont été significativement augmentés par l'apport d'azote (N100) comparativement à N0, ce qui fut également le cas de la féverole d'hiver associée et dans une moindre mesure du blé dur associé. En 2006-2007, en moyenne pour tous les niveaux de fertilisation et tous les cultivars de blé dur, la féverole d'hiver constituait 77% de la matière sèche et 92% du rendement. En 2007-2008, la féverole d'hiver était également largement majoritaire dans l'association en N0AB* puisque la matière sèche de l'association était alors composée à 66% par la féverole d'hiver et le rendement à 72%. A contrario dans le cas du traitement N0P1, la féverole d'hiver ne représentait plus que 38% du rendement et 35% de la matière sèche tout comme en 2005-2006 où l'association était composée à 37% par la légumineuse. Comme attendu, le rendement et la matière sèche des espèces associées ont été toujours inférieurs à ceux de leurs cultures « pures » respectives.

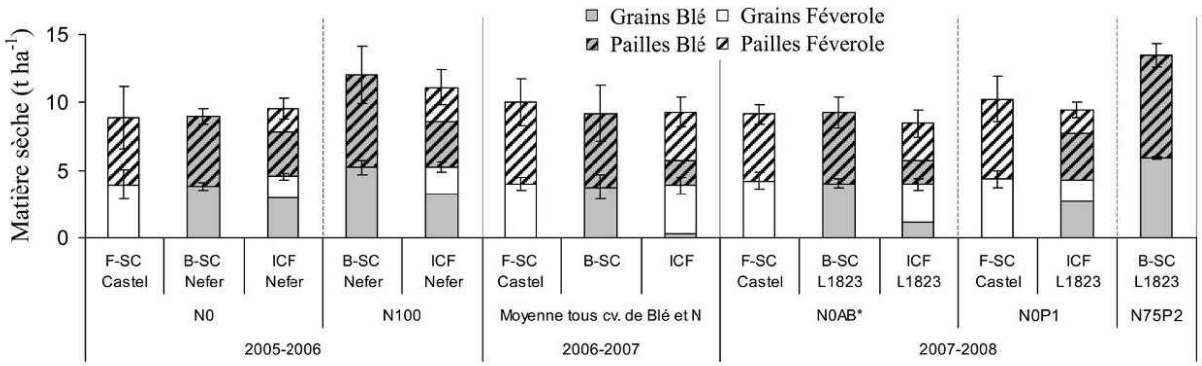


Figure 16 *Matière sèche (t ha^{-1}) des pailles et des grains de la féverole d'hiver (F) et du blé dur (B) en culture « pure » (SC) et en association (IC) pour les différentes expérimentations et traitements. Les valeurs sont la moyenne de n=3 à 5 ± écart type calculé sur le rendement et sur la matière sèche totale.*

II.3.2.2. Land equivalent ratio pour la matière sèche et le rendement

Les LER calculés à partir de la matière sèche ou du rendement (**Figure 17**) ont été supérieurs à 1 en 2005-2006 (1.06 et 1.15 respectivement), légèrement inférieurs à 1 en 2006-2007 (0.95 et 0.98 respectivement en moyenne pour tous les niveaux d'azote et cultivars de blé dur) et en 2007-2008 en N0AB* (0.92 et 0.95 respectivement) et égaux à 1 pour le traitement N0P1 (2007-2008). Ces résultats indiquent que les ressources ont été utilisées pour la production de biomasse et pour le rendement de façon moins efficace qu'en cultures « pures » à l'exception de la première année (2005-2006) et du traitement N0P1 en 2007-2008. Les LER partiels de la féverole d'hiver étaient inférieurs à 0.5 uniquement en 2005-2006 (N0) et en 2007-2008 (N0P1) alors que ceux du blé dur l'ont été dans toutes les expérimentations à l'exception de 2005-2006.

Comparativement aux cultures « pures » (SC), les associations sont plus efficaces du point de vue de l'azote accumulé et moins efficaces vis-à-vis du rendement (Y) ou de la matière sèche (DW). En effet, quels que soient les expérimentations ou traitements considérés, les LER totaux ont été en moyenne de 1.20 pour le LER_N contre seulement 1.01 et 0.98 pour LER_Y et LER_{DW}. Par ailleurs, les LER partiels du blé dur et de la féverole d'hiver sont plus élevés lorsqu'ils sont calculés à partir de l'azote accumulé que du rendement ou de la matière sèche sauf ceux de la féverole d'hiver qui ne sont pas significativement différents qu'ils soient calculés à partir de l'N ou du rendement.

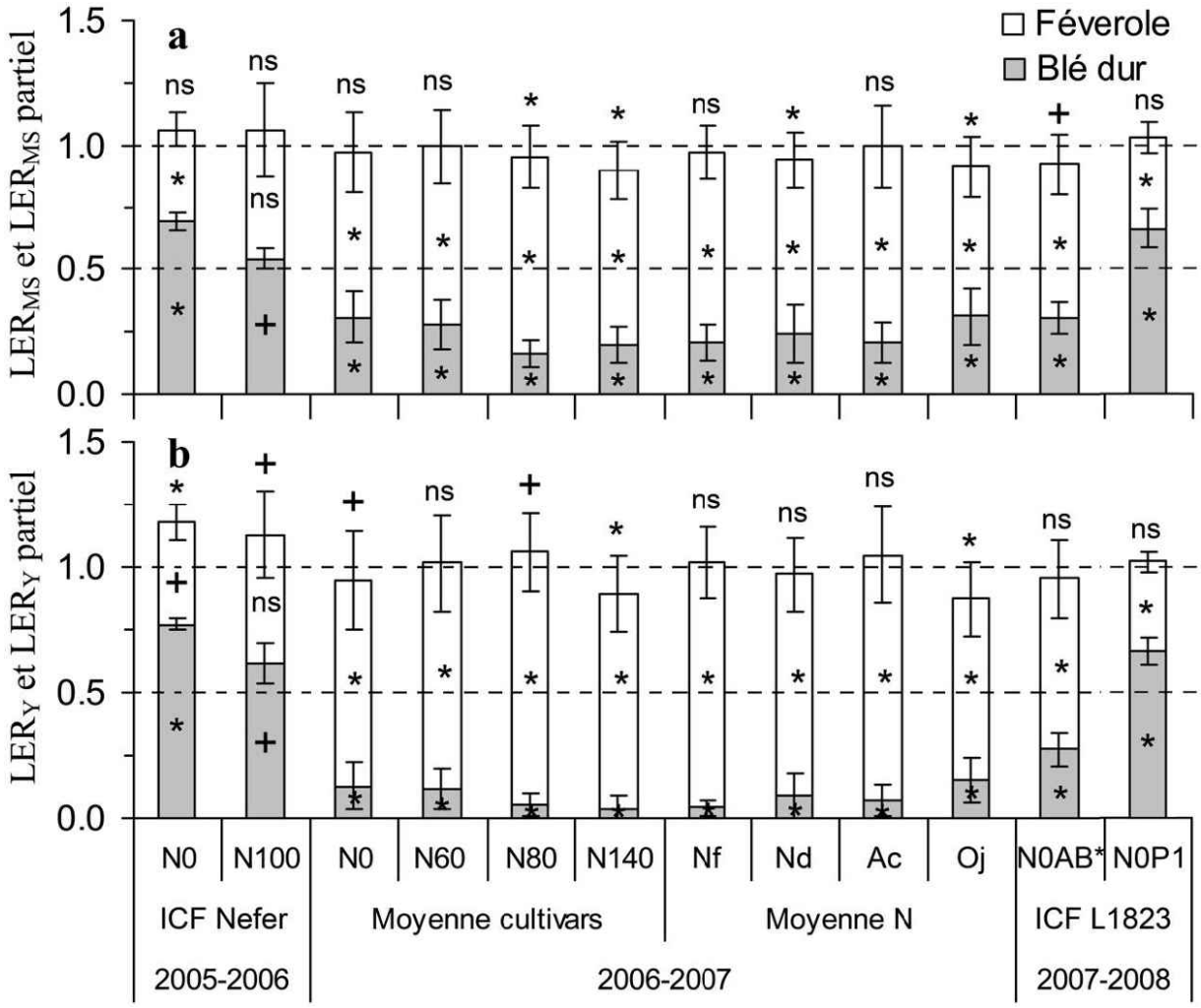


Figure 17 *Land equivalent ratio partiels (LER) du blé dur et de la féverole d'hiver calculés à partir (a) de la matière sèche (LER_{DW}) et (b) du rendement (LER_Y) pour les différentes expérimentations et traitements. Les valeurs sont la moyenne de n=3 à 5 ± écart type. Les symboles (+) et (*) au dessus des barres indiquent que les valeurs de LER sont significativement différentes de 1 à P<0.10 et P<0.05 respectivement. Les symboles (+) et (*) dans les barres indiquent que les valeurs de LER partiels (du blé dur et de la féverole d'hiver) sont significativement différentes de 0.5 à P<0.10 et P<0.05 respectivement. 'ns' indique que les valeurs sont non significatives (P>0.10). Une valeur de LER supérieure à 1 indique que l'association est plus efficace que les cultures pures du point de vue de la production de matière sèche ou du rendement et vice versa. Une valeur de LER partiel inférieure à 0.5 indique que la matière sèche ou le rendement d'une espèce (par plante ou par rang) est inférieur dans l'association par rapport à la culture « pure » (voir* ***Chapitre II, Partie V*** *pour plus de détails).*

II.3.3. L'association blé dur – féverole d'hiver améliore la teneur en protéines du blé dur

La **Figure 18** montre que pour l'ensemble des traitements et expérimentations l'association blé dur – féverole d'hiver permet d'augmenter significativement la teneur en protéines du blé dur comparativement à la culture « pure ». On observe entre autre que le gain a été particulièrement élevé en 2006-2007 et ceci quel que soit le cultivar de blé dur. En 2005-2006, la teneur en protéines du blé dur a été significativement augmentée par l'apport d'azote en N100 par rapport à la situation non fertilisée, et ce aussi bien en association qu'en culture « pure ». Par ailleurs, l'augmentation de la teneur en protéines du blé dur en association par

rapport à la culture « pure » a été supérieure en N0 par rapport à N100 (+22% et +15% respectivement). Enfin, en 2007-2008, l'association a permis d'augmenter la teneur en protéines du blé dur en situation sans intrant chimique (N0AB*) de l'ordre de 25%. Par contre, l'association N0P1 n'a pas permis d'accroître la teneur en protéines du blé dur par rapport au blé dur « pur » en N0AB*.

La **Figure 19** indique que pour une expérimentation et un niveau de fertilisation donnés la teneur en protéines du blé dur est négativement corrélée au rendement. On observe par ailleurs que la relation est linéaire en 2005-2006 (N0 et N100) ainsi qu'en 2007-2008 (N0P1 et N0AB*). Par contre, en 2006-2007 on observe une réponse de type puissance qui souligne que la teneur en protéines du blé dur augmente très fortement lorsque le rendement de celui-ci devient inférieur à approximativement 1 t ha^{-1}.

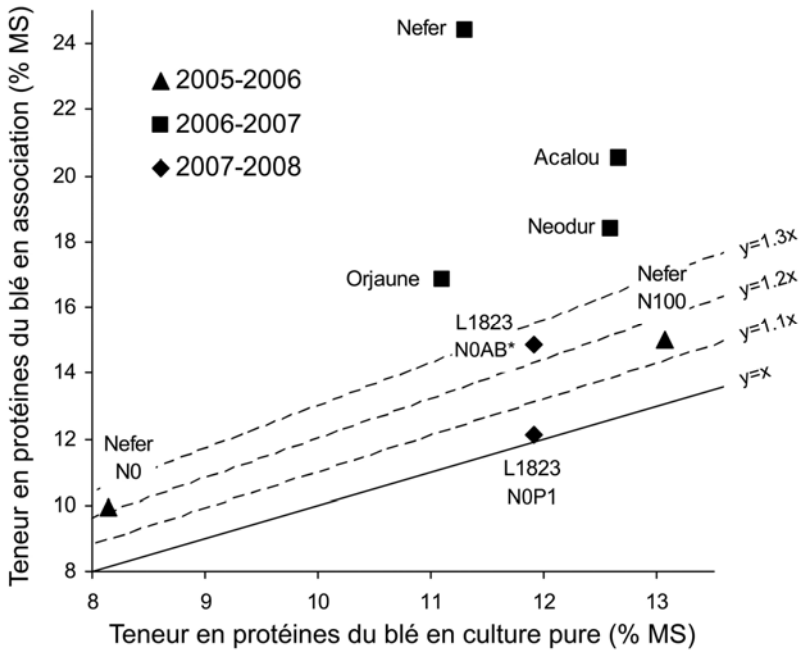


Figure 18 *Teneur en protéines du blé dur en association avec la féverole d'hiver (% de la matière sèche) en fonction de la teneur en protéines du blé dur en culture « pure » pour les différents essais et traitements. En 2006-2007, les points correspondent à la moyenne des traitements azotés par cultivar.*

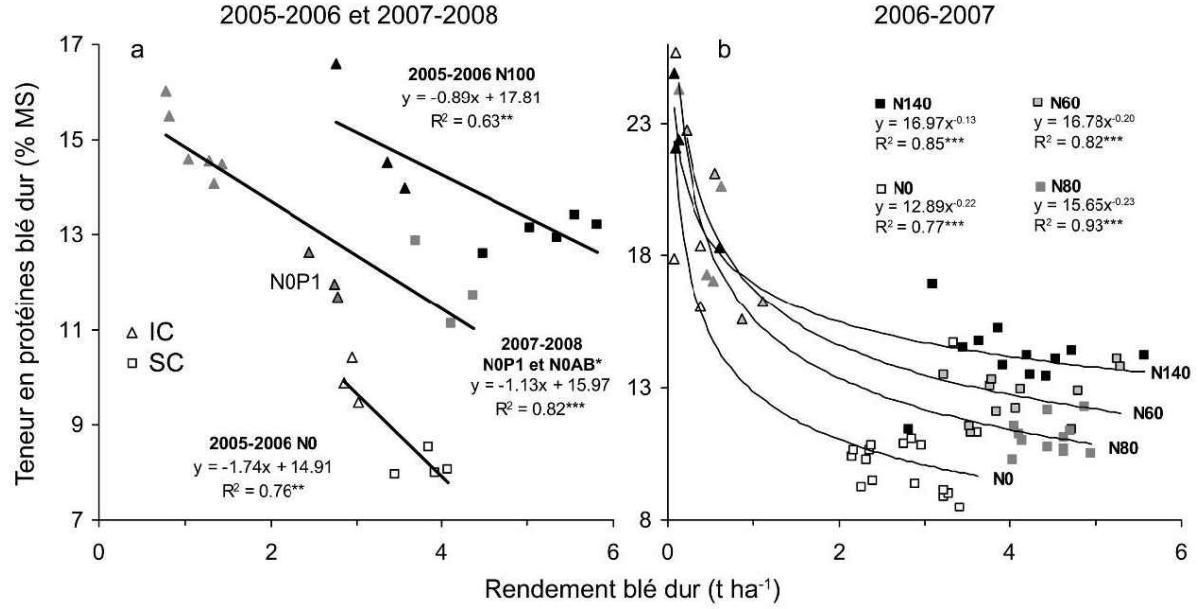


Figure 19 *Teneur en protéines (% de la matière sèche) du blé dur en fonction du rendement du blé dur en culture « pure » et en association avec la féverole d'hiver en a) 2005-2006 et 2007-2008 et b) 2006-2007 (tous cultivars de blé dur confondus). '**' et '***' indiquent que les régressions sont significatives à P=0.01 et P=0.001 respectivement.*

II.3.4. Dynamique de l'acquisition de l'azote, de la matière sèche et croissance en hauteur

II.3.4.1. Dynamique de l'acquisition de l'azote

La quantité d'azote accumulée dans les parties aériennes par les différents couverts augmente au cours du cycle (**Figure 20**) à l'exception de celle du blé dur associé qui diminue de la floraison du blé dur à la récolte et celle du blé dur « pur » qui reste stable entre ces deux derniers prélèvements. On remarque par ailleurs que l'association et la féverole d'hiver « pure » accumulent une quantité d'azote similaire qui est supérieure à celle du blé dur « pur » à partir du stade épi 1 cm du blé dur. De même, la féverole d'hiver associée accumule plus d'azote que le blé dur associé à partir du stade épi 1 cm du blé dur en 2006-2007 et du début de la floraison de la féverole d'hiver en 2007-2008. Enfin, jusqu'au début de la floraison de la féverole d'hiver, le blé dur associé accumule une quantité d'azote légèrement inférieure à celle du blé dur « pure » mais la différence s'accentue ensuite jusqu'à la maturité.

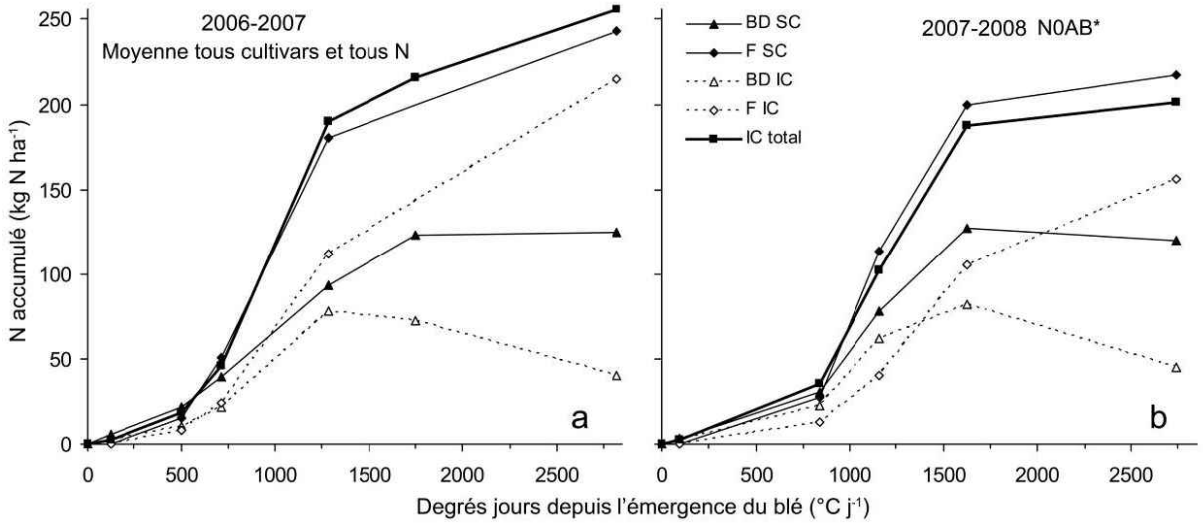


Figure 20 *Evolution de la quantité d'azote accumulée dans les parties aériennes en kg N ha^{-1} dans les cultures « pures » (SC) et les associations (IC) pour la féverole d'hiver (F) et le blé dur (BD) en a) 2006-2007 et b) 2007-2008 en fonction de la somme de degrés jours depuis l'émergence du blé dur. Les valeurs sont la moyenne de n=3 à 6.*

II.3.4.2. Dynamique de la production de matière sèche

La production de matière sèche par les cultures augmente d'abord lentement jusqu'au stade épi 1 cm du blé dur puis de façon beaucoup plus rapide pour atteindre son maximum à la floraison du blé dur (**Figure 21**). Comme précédemment pour l'azote accumulé, on note une diminution de la matière sèche apparente du blé dur (partie récoltable sur pied) en association avec la féverole d'hiver entre la floraison et la maturité physiologique ce qui a pour conséquence de diminuer également la matière sèche totale de l'association. On observe par ailleurs que la matière sèche de l'association est comparable à celle de la féverole d'hiver « pure » et du blé dur « pur » en 2007-2008 alors qu'en 2006-2007 la matière sèche totale de l'association est supérieure à celle du blé dur « pur » dès le stade épi 1 cm. Enfin, jusqu'à la floraison de la féverole d'hiver (2006-2007) et jusqu'à la floraison du blé dur (2007-2008) il n'y a pas de différence significative entre la matière sèche de la féverole d'hiver et du blé dur associées. Par contre, celle de la féverole d'hiver devient ensuite très supérieure à celle du blé dur et tout particulièrement en 2006-2007.

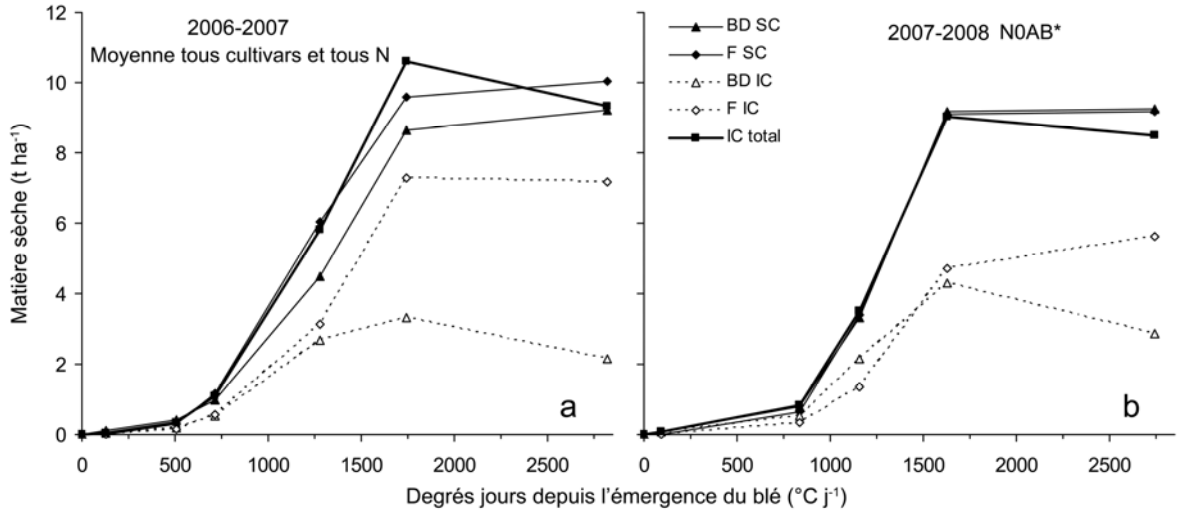


Figure 21 *Evolution de la matière sèche aérienne en t ha^{-1} dans les cultures « pures » (SC) et les associations (IC) pour la féverole d'hiver (F) et le blé dur (BD) en a) 2006-2007 et b) 2007-2008 en fonction de la somme de degrés jours depuis l'émergence du blé dur. Les valeurs sont la moyenne de n=3 à 6.*

II.3.4.3. Dynamique de la croissance en hauteur

Au cours des deux expérimentations 2006-2007 et 2007-2008 nous n'avons pas observé de différence significative de hauteur entre le blé dur cultivé seul et le blé dur associé à la féverole d'hiver (**Figure 22**). *A contrario*, la hauteur de la féverole d'hiver associée a été inférieure à celle de la féverole d'hiver « pure » dans les deux expérimentations mais cette différence est significative uniquement en fin de cycle en 2007-2008 alors qu'elle est apparue beaucoup plus précocement en 2006-2007. On remarque également que la féverole d'hiver associée est significativement plus haute que le blé dur associé et ce dès le début de la floraison de la légumineuse. Par contre, cette différence devient nulle ensuite en 2007-2008 alors que l'écart s'accroît en 2006-2007. On notera enfin que le cultivar L1823 utilisé en 2007-2008 a eu une hauteur de paille finale de 114 cm qui a été supérieure à celle des cultivars Nefer, Neodur et Acalou utilisés en 2006-2007 (93, 84 et 87 cm respectivement) mais identique à celle du blé dur Orjaune (114 cm).

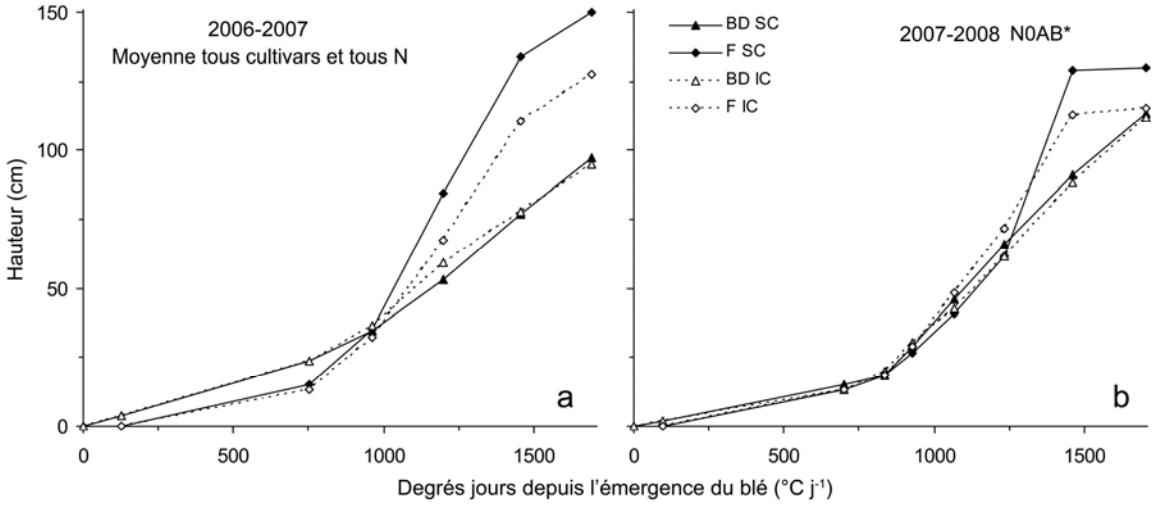


Figure 22 *Evolution de la hauteur des couverts en cm dans les cultures « pures » (SC) et les associations (IC) pour la féverole d'hiver (F) et le blé dur (BD) en a) 2006-2007 et b) 2007-2008 en fonction de la somme de degrés jours depuis l'émergence du blé dur. Les valeurs sont la moyenne de n=3 à 6.*

II.3.5. Effet de la biomasse et de la densité des deux espèces sur la production

II.3.5.1. Relation entre les niveaux de production de chaque espèce

La **Figure 23** met en évidence la diminution du rendement et de la matière sèche de la féverole d'hiver associée avec l'augmentation de la matière sèche du blé dur dans l'association. Les régressions ajustées à partir d'un modèle linéaire sont une première approximation des relations obtenues ; elles indiquent qu'en l'absence de blé dur dans l'association le rendement de la féverole d'hiver serait de 4.6 t ha^{-1} pour une biomasse de 9.1 t ha^{-1}. A l'opposé, la matière sèche et le rendement de la féverole d'hiver seraient nuls dès lors que la biomasse du blé dur serait supérieure à 10 t ha^{-1} environ. Par ailleurs, ces ajustements tendent à montrer que la biomasse et le rendement de la féverole d'hiver diminuent avec l'augmentation de la biomasse du blé dur associé respectivement de 0.90 t ha^{-1} et 0.47 t ha^{-1} par tonne de MS de blé dur. Cela revient à considérer que l'indice de récolte de la féverole d'hiver est stable et égal à 0.52.

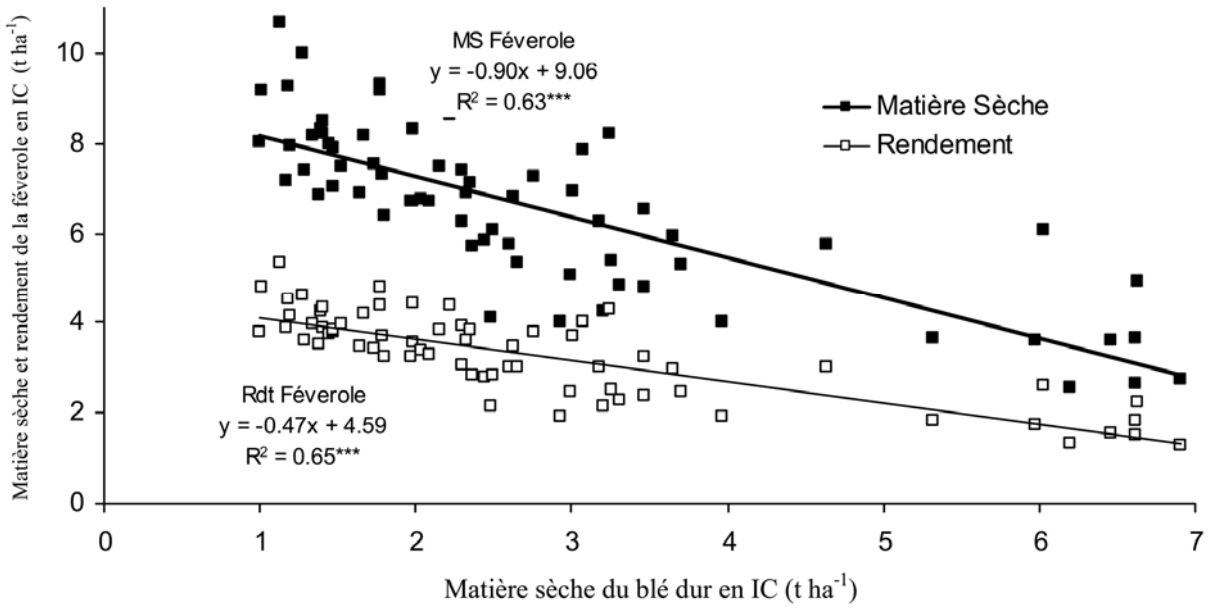


Figure 23 *Matière sèche et rendement (t ha^{-1}) de la féverole d'hiver en association (IC) en fonction de la matière sèche du blé dur en association (t ha^{-1}) pour l'ensemble des expérimentations et traitements. Les régressions linéaires ont été obtenues en considérant l'ensemble des points '***' indique que la régression est significative à P=0.001.*

La **Figure 24** montre, comme précédemment, la relation négative qui existe entre la production de blé dur dans l'association (matière sèche et rendement) avec la biomasse de la féverole d'hiver associée. Les droites de régression obtenues suggèrent que la biomasse du blé dur serait de 7.4 t ha^{-1} en absence de féverole d'hiver pour un rendement de 3.3 t ha^{-1}. A l'inverse, le rendement et la biomasse du blé dur seraient nuls dès lors que la biomasse de la féverole d'hiver dépasserait 8.4 t ha^{-1} et 10.6 t ha^{-1} respectivement. Les ajustements réalisés indiquent que la biomasse et le rendement du blé dur diminuent avec l'augmentation de la biomasse de la féverole d'hiver respectivement de -0.70 t ha^{-1} et -0.39 t ha^{-1} par tonne de MS de féverole d'hiver ce qui correspond à un indice de récolte constant du blé dur égal à 0.56.

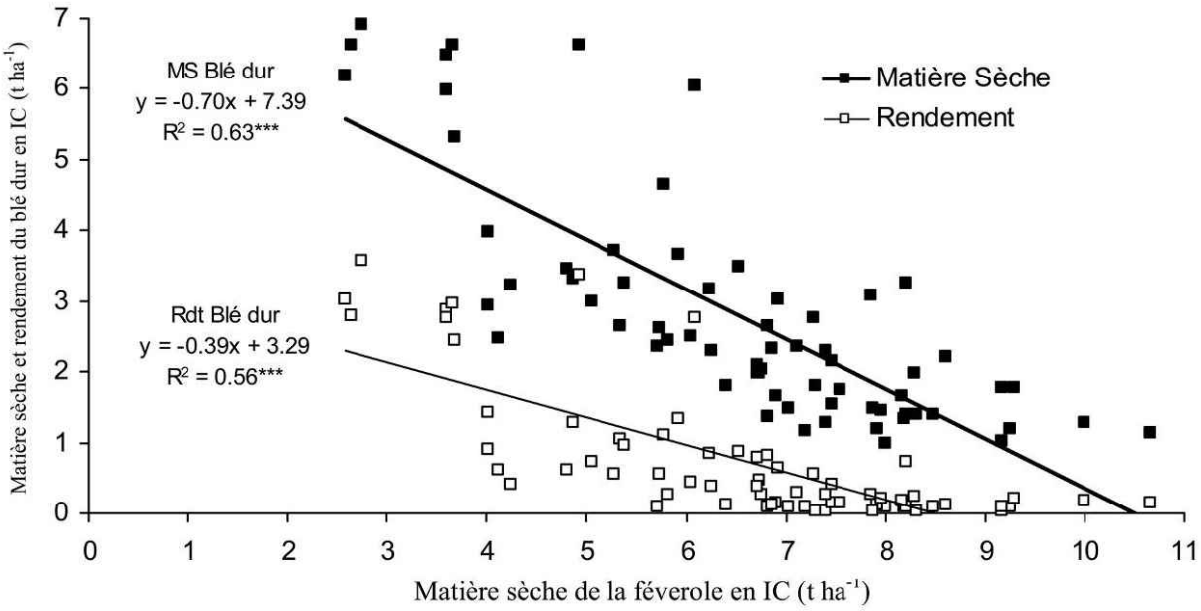


Figure 24 *Matière sèche et rendement (t ha^{-1}) du blé dur en association (IC) en fonction de la matière sèche de la féverole d'hiver en association (t ha^{-1}) pour l'ensemble des expérimentations et traitements. Les régressions linéaires ont été obtenue en considérant l'ensemble des points '***' indique que la régression est significative à P=0.001.*

II.3.5.2. Relation entre les biomasses et les densités des deux espèces

La **Figure 25** représente les matières sèches du blé dur et de la féverole d'hiver en association en fonction du rapport entre les densités de la féverole d'hiver et du blé dur observées en association. Les régressions linéaires indiquent que la matière sèche de la féverole d'hiver est positivement corrélée avec le ratio féverole d'hiver/blé dur et celle du blé dur négativement. En d'autres termes, plus la proportion de plantes de féverole d'hiver dans le mélange est importante plus la production de féverole d'hiver sera élevée et celle du blé dur faible. D'après les régressions linéaires, la biomasse de la céréale en absence de féverole d'hiver (ratio égal à 0) serait de 7.8 t ha^{-1} et nulle pour des ratios de densité supérieurs à 0.34. Dans le cas de la féverole d'hiver, nous avons choisi de forcer la régression à passer par l'origine du repère sans quoi l'ajustement aurait conduit à une estimation d'une biomasse de féverole d'hiver de 1.4 t ha^{-1} pour une ratio de densité de 0, c'est-à-dire en absence de féverole d'hiver.

La **Figure 26** est une autre manière de présenter les résultats précédents mais cette fois en considérant le rapport de densité entre le blé dur et la féverole d'hiver. Cette représentation permet d'estimer la production de biomasse de féverole d'hiver en absence de blé dur à 10.3 t ha^{-1} et d'estimer que celle-ci serait nulle au-delà d'un rapport de densité de 13.8. Par ailleurs, la régression ajustée pour le blé dur tend à montrer que la production de biomasse de la céréale serait nulle dès lors que le ratio blé dur/féverole d'hiver serait inférieur à 1.6 c'est-à-dire dès que le nombre de plantes de blé dur serait inférieur à 1.6 fois celui de la féverole d'hiver.

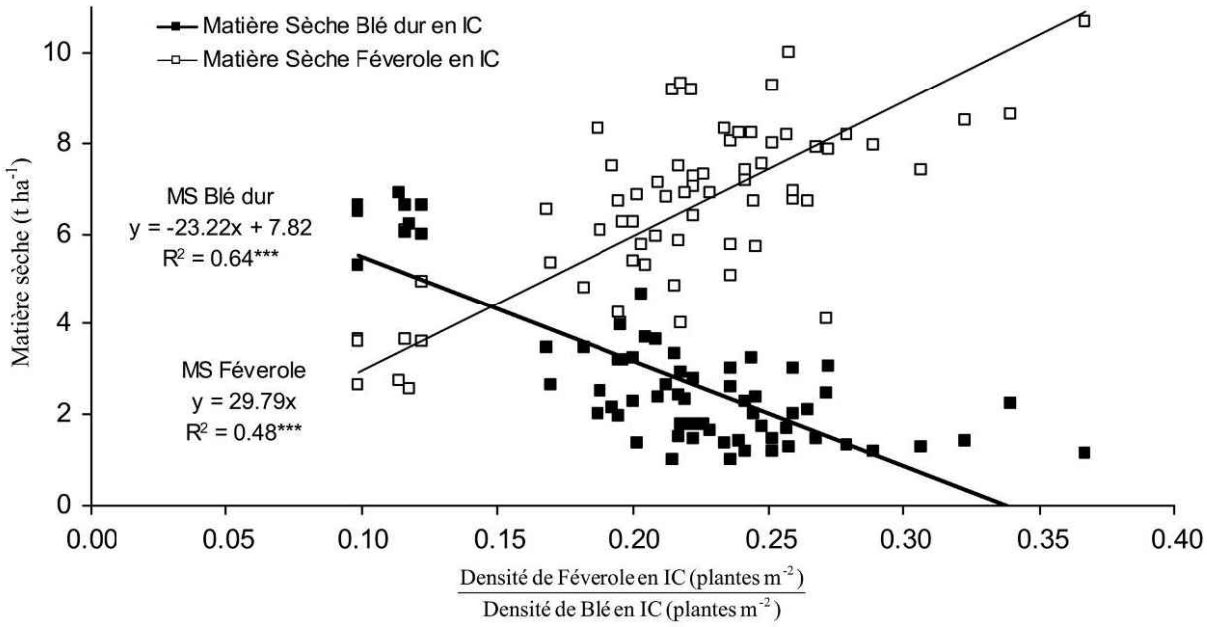


Figure 25 *Matière sèche du blé dur et de la féverole d'hiver en association (IC) en fonction du rapport entre le nombre de plantes de féverole d'hiver et de blé dur observés en association.*

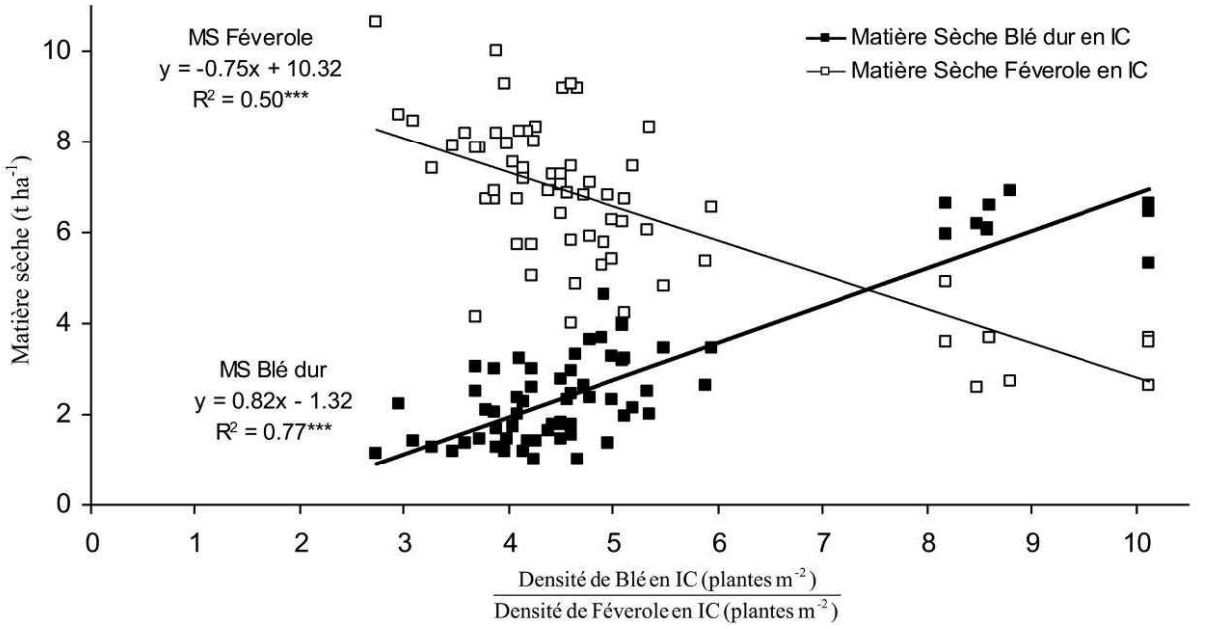


Figure 26 *Matière sèche du blé dur et de la féverole d'hiver en association (IC) en fonction du rapport entre le nombre de plantes de blé dur et de féverole d'hiver observées en association. Les régressions linéaires ont été obtenue en considérant l'ensemble des points '***' indique que la régression est significative à P=0.001.*

II.4 Discussion

II.4.1. Complémentarité pour l'azote dans les associations

Quelle que soit la proportion des deux espèces dans le mélange final, l'association blé dur – féverole d'hiver reste toujours plus performante que les cultures « pures » pour l'utilisation de l'azote. Nous l'avons montré grâce au calcul de LER_N dont les valeurs ont toujours été supérieures à 1. Ces résultats s'expliquent par la complémentarité entre céréale et légumineuse pour l'utilisation de l'azote, plus précisément par l'utilisation de l'azote minéral du sol par la céréale et de l'azote de l'air par la légumineuse comme source principale d'azote (environ 80%). En 2007-2008 nous avons calculé un LER_N de 1.09 pour l'association N0P1 en considérant comme référence pour le blé dur « pur » le traitement N0AB*. Or il est très probable que cette valeur ait été légèrement surestimée si l'on fait l'hypothèse qu'en raison d'une meilleure levée (semences traitées) le rendement, la matière sèche et l'azote accumulé par le blé dur seul N0P1 auraient été supérieurs à ceux du blé dur « pur » N0AB*. Par conséquent, en l'absence de blé dur seul en N0P1 on ne peut pas conclure sur l'efficacité globale de cette association mais on notera que la féverole d'hiver a été très sensiblement affectée par rapport au mélange N0AB* comme le montre la forte diminution de son LER_N partiel de 0.72 à 0.39.

Par contre, comme nous l'avons également mis en évidence dans le cas de l'association blé dur – pois d'hiver, lorsque la fertilisation azotée est apportée de manière précoce (N80 et N140 en 2006-2007) cette complémentarité se trouve réduite très certainement en raison d'une inhibition de la fixation symbiotique par les nitrates du sol. Selon Voisin et al. (2002) cette fixation serait inhibée dès lors que la concentration en nitrate du sol dans l'horizon 0-30 cm dépasserait 30 kg N ha^{-1}. Nous n'observons pourtant pas de tels résultats dans le cas du traitement azoté N100 (2005-2006) qui a également reçu un apport d'engrais précoce (50 kg N ha^{-1} à épi 1cm). Cela pourrait s'expliquer par une faible efficacité de cet apport mais également par des différences de disponibilités en azote par rapport à N80 et N140 en lien avec la minéralisation des résidus de culture. En effet, nous avons calculé que la disponibilité en azote sur le profil de sol de 0-120 cm pour la période du semis au début de la floraison des légumineuses avait été de 77 kg N ha^{-1} en N100 contre 129 kg N ha^{-1} pour N80 et 161 kg N ha^{-1} pour N140. Ces différences pourraient donc expliquer partiellement le taux de fixation symbiotique plus élevé en N100 comparativement aux autres traitements ayant également reçu un apport précoce d'azote.

II.4.2. Performance des associations pour la matière sèche et le rendement

Les résultats des trois années d'expérimentation montrent des résultats très disparates avec en particulier de fortes variations quant à la proportion des deux espèces dans le mélange final. En particulier en 2006-2007 et 2007-2008 (N0AB*) nous avons observé une très faible proportion de blé dur dans le mélange récolté.

Les LER calculés à partir de la matière sèche ou du rendement donnent une indication quant à la performance des associations vis-à-vis des cultures monospécifiques et traduisent l'efficacité de ces systèmes pour l'utilisation des ressources du milieu (lumière, eau, nutriments et particulier l'azote). On observe ainsi que lors de la première année d'expérimentation les associations blé dur – féverole d'hiver ont été plus efficaces que les cultures « pures » de l'ordre de 6% en N0 et 15% en N100. A contrario, en 2006-2007, les associations ont été 7% moins performantes que les cultures « pures » en raison de la quasi absence de blé dur dans le mélange récolté, ce qui fût également le cas en 2007-2008 en

situation sans intrant (N0AB*) alors que dans la situation N0P1 la moindre efficacité de l'association s'explique par une faible production de la féverole d'hiver. D'ailleurs comme nous l'avons indiqué précédemment, en l'absence de blé dur seul en N0P1 on ne peut pas conclure sur l'efficacité globale de l'association blé dur – féverole d'hiver en N0P1 et il semble raisonnable de penser que les valeurs de LER_Y et LER_{MS} sont légèrement surestimées.

Nos résultats montrent par ailleurs qu'en 2005-2006 la céréale a bénéficié de l'association plus que la légumineuse comme le montrent les LER partiels du blé dur supérieurs à 0.5. Par ailleurs, dans la situation N100 on se trouve dans des conditions de facilitation à savoir que les deux espèces ont des LER partiels supérieurs à 0.5 indiquant qu'elles ont toutes les deux fait mieux qu'en culture « pure ». A contrario, en 2006-2007 et 2007-2008 (N0AB*), c'est la légumineuse qui a le plus profité de l'association et ceci au détriment de la céréale. Enfin, dans la situation N0P1 (2007-2008) c'est le blé dur qui a le plus profité de l'association au détriment de la féverole d'hiver.

II.4.3. L'association blé dur – féverole d'hiver et l'amélioration de la qualité du blé dur

Nous avons montré que les associations blé dur – féverole d'hiver permettaient d'améliorer sensiblement la teneur en protéines du blé dur et ceci dans toutes les situations. Cette augmentation a été vertigineuse en 2006-2007 et ne doit donc pas être vue comme un avantage fort de l'association mais bien comme le résultat d'un rendement extrêmement faible de la céréale en association. Cela a également été le cas en 2007-2008 pour le traitement en N0AB* où l'augmentation de la teneur en protéines du blé dur s'explique d'abord par un très faible rendement de la céréale dans l'association. Néanmoins, en 2005-2006 on observe également une augmentation significative de la teneur en protéines du blé dur en associations comparativement à la culture « pure » du blé dur. Comme dans le cas des associations blé dur – pois d'hiver, ces résultats peuvent s'expliquer par : i) la réduction du rendement du blé dur (par unité de surface) en association par rapport à la culture « pure » du fait des compétitions interspécifiques et ii) une moindre utilisation de l'azote minéral du sol par la légumineuse qui s'explique par un taux de fixation d'environ 80%. Dès lors, la céréale dispose par épi et unité de masse de grain d'une quantité supérieure d'azote permettant une meilleure nutrition azotée et un meilleur remplissage des grains.

On remarquera également que l'accroissement de la teneur en protéines du blé dur a été supérieur en N0 comparativement à N100. En effet, en N0, l'azote a été fortement limitant ; dès lors, une petite augmentation de la disponibilité en azote par unité de masse de grain a certainement permis un gain sensible de remplissage en azote. Cela a également été le cas, mais dans une moindre mesure, dans la situation N100 où l'azote a été moins limitant. Enfin, en 2007-2008 l'association N0P1 permet d'atteindre la même teneur en protéines que le blé dur seul en N0AB*. En l'absence de blé dur seul en N0P1 on ne peut pas conclure sur l'efficacité de cette association. On peut toutefois faire l'hypothèse qu'en raison d'une meilleure levée (semences traitées) le rendement du blé dur seul N0P1 aurait été supérieur à celui du blé dur N0AB*. Or, il a été montré par de nombreux auteurs (e.g. Gate 1995) que la teneur en protéines d'un blé dur était négativement corrélée avec son rendement et par conséquent on s'attendrait à ce que la teneur en protéines du blé dur N0P1 soit inférieure à celle du blé dur N0AB*. Nous pouvons donc faire l'hypothèse d'un effet de l'association pour améliorer la qualité du blé dur par rapport à la culture monospécifique correspondante.

II.4.4. La croissance dynamique du blé dur et de la féverole d'hiver

Les données dynamiques de production de matière sèche, d'azote accumulé et de hauteur sur les associations blé dur – féverole d'hiver nous permettent de comprendre *a priori* quand la production du blé dur à été sensiblement affectée par la compétition de la féverole d'hiver en 2006-2007 et 2007-2008 (AB*). Pour autant, en l'absence d'un tel suivi sur des cultures « pures » en demi-densité ou pour les associations pour lesquelles la production de blé dur n'a pas été négligeable (2005-2006 et 2007-2008 en N0P1), il est délicat de conclure avec certitude sur les processus dynamiques de compétitions. En effet, comme indiqué dans la **Partie V du Chapitre II** (matériels et méthodes) seule une analyse des indices de compétitions inter- et intraspécifiques en dynamique permet de comprendre la mise en place des compétitions.

Néanmoins, en première analyse il semble que le blé dur ne soit pas affecté par la féverole d'hiver jusqu'au stade épi 1 cm voire jusqu'au début de la floraison de la légumineuse. Par contre, on observe que la différence entre la biomasse du blé dur « pur » et celle du blé dur associé s'accroît progressivement jusqu'à la floraison du blé dur ce qui semble indiquer une compétition interspécifique de la féverole d'hiver sur le blé dur supérieur aux compétitions intraspécifiques. Ces résultats sont cohérents avec le fait que c'est à partir de la floraison de la légumineuse que celle-ci devient plus haute que le blé dur et que sa production de biomasse augmente fortement ce qui a dû se traduire par une disponibilité en lumière moindre pour le blé dur associé.

Ensuite, à partir de la floraison du blé dur, on observe que la biomasse du blé dur « pur » se stabilise alors que celle du blé dur associé diminue. Cette perte de biomasse peut s'expliquer par : i) des tardillons qui tombent au sol et commence à être dégradés par décomposition via les microorganismes et/ou ii) un accroissement des maladies foliaires du blé dur dans les couverts associés. Par ailleurs, on a observé une moindre fertilité des épis en 2006-2007 où l'indice de récolte n'a été que de 0.15 pour le blé dur associé contre 0.39 en 2007-2008 en N0AB* et 0.43 pour le traitement N0P1. Ainsi, en 2007-2008 (N0AB*) la fertilité du blé dur en association semble avoir été peu affectée par la présence de la féverole d'hiver. Ce résultat peut s'expliquer par la structure du couvert qui consistait en 6 rangs de blé dur et 3 rangs de féverole d'hiver contre 6 rangs de blé dur et 5 rangs de féverole d'hiver en 2006-2007 ce qui semble *a priori* moins défavorable au blé dur en raison de l'éloignement des rangs de féverole d'hiver et donc de la compétition interspécifique. Dès lors, la moindre production de blé dur dans l'association en 2007-2008 (N0AB*) s'expliquerait avant tout par la très faible levée de la céréale (59 plantes m^{-2}) qui n'a pas pu être compensée par le tallage.

A l'inverse du blé dur, la matière sèche de la féverole d'hiver dans les associations en 2006-2007 et 2007-2008 (N0AB*) semble avoir été faiblement affectée par la présence du blé dur et ceci tout particulièrement en 2006-2007. En effet dans cette expérimentation la densité de la féverole d'hiver en association était de 23 plantes m^{-2} soit une densité proche de celle recommandée pour une culture « pure » et de 46 plantes m^{-2} dans les couverts monospécifiques. Par conséquent, les compétitions intraspécifiques ont été fortement accrues dans les cultures « pures » de féverole d'hiver ce qui a certainement été préjudiciable à la féverole d'hiver et s'est traduit par une hauteur du couvert supérieure à la féverole d'hiver associée et ce avant même le début de sa floraison. *A contrario*, en 2007-2008 (N0AB*), cette différence n'a été observée qu'à partir de la floraison du blé dur, et qui plus est, dans une moindre mesure. Enfin, il est remarquable de constater que la hauteur du blé dur n'a pas été accrue en association comme on pouvait s'y attendre. On peut émettre l'hypothèse que l'accroissement des compétitions pour la lumière, en lien avec une hauteur et une biomasse de la légumineuse importantes, s'est fait de manière intense et rapide si bien que le blé dur n'a pas été en mesure de compenser ce manque de lumière par un accroissement des entre nœuds ou bien que le blé dur a atteint sa taille génétique maximale.

II.4.5. Une performance qui est fonction des densités des deux espèces

Les différentes relations mises en évidence précédemment tendent à montrer que la production de chacune des espèces dans le mélange est fonction de la production de l'autre espèce. Plus précisément, plus la biomasse d'une espèce 'A' sera importante plus celle de l'espèce associée 'B' sera faible, traduisant un accroissement des compétitions interspécifiques dans le mélange avec l'accroissement de la biomasse d'une espèce par rapport à l'autre. Par ailleurs, nous avons également montré qu'en relatif la perte de matière sèche d'une espèce était moins sensible que celle du rendement avec l'augmentation de la matière sèche de l'autre espèce. Par conséquent ; l'indice de récolte que l'on pourrait estimer à partir de ce modèle diminuerait progressivement, d'abord lentement puis de façon brutale avec l'accroissement de la matière sèche de l'espèce associée. Cela indique donc qu'au-delà d'un certain niveau de compétition l'espèce fortement dominée parvient à produire une certaine quantité de biomasse mais pas de grains correctement remplis en C et N.

Pour une première approche et par simplification, un modèle linéaire a été ajusté (**Figure 27, courbe C**) pour représenter l'évolution de la biomasse d'une espèce en fonction de celle de l'espèce associée. Or, *a priori*, il n'y a pas de raison de penser que cette réponse soit linéaire, en particulier lorsque la production de biomasse de l'espèce 'A' est faible car cela ne devrait pas avoir de conséquence significative sur la production de l'espèce 'B'. Par conséquent, d'autres modèles peuvent être proposés, comme par exemple ceux décrits à la **Figure 27**. Dans le cas d'une réponse de type concave (**Figure 27, courbe A**), la biomasse de l'espèce 'B' diminue de plus en plus fortement avec l'accroissement de la biomasse de l'espèce 'A'. L'asymptote à l'origine est horizontale indiquant qu'une faible biomasse de l'espèce 'A' n'a pas d'effet sur la biomasse de l'espèce 'B'. A l'opposé, lorsque la biomasse de l'espèce 'A' devient trop importante cela génère de fortes compétitions qui se traduisent par une diminution très rapide de la biomasse de l'espèce 'B' et correspond donc à une asymptote verticale. Ce type de réponse pourrait correspondre à l'espèce la plus compétitive et donc plutôt à la féverole d'hiver dans notre situation.

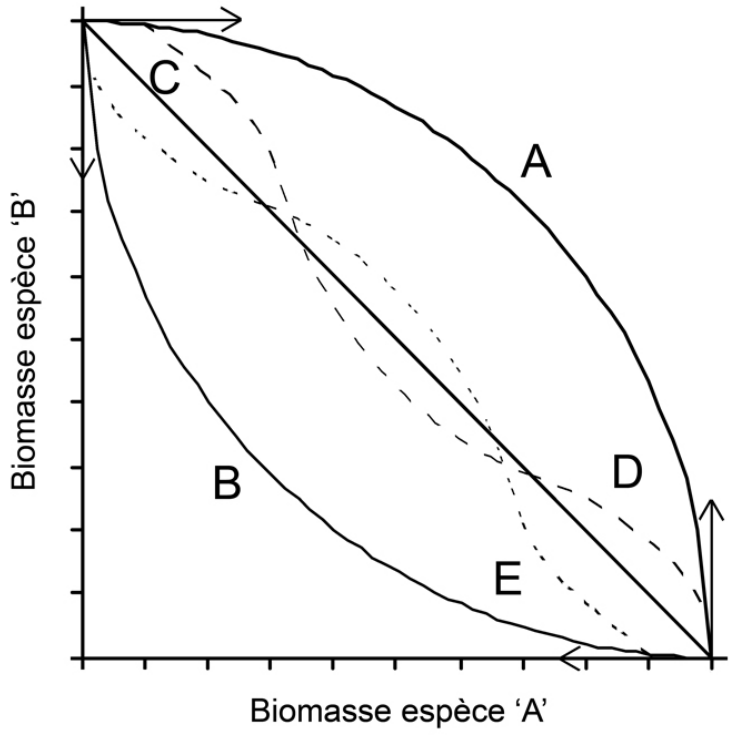


Figure 27 *Evolution de la matière sèche d'une espèce 'B' en fonction de la matière sèche de l'espèce associée 'A' en considérant un modèle concave (A), convexe (B), linéaire (C) ou des modèles complexes (D et E). Les flèches indiquent les asymptotes horizontales et verticales.*

A l'inverse nous pourrions avoir une réponse de type convexe (**Figure 27 courbe B**) ; dans ce cas l'évolution de la biomasse de l'espèce 'B' avec l'accroissement de la biomasse de l'espèce 'A' est d'abord très rapide (asymptote verticale à l'origine) ce qui indique qu'un faible accroissement de la biomasse de l'espèce 'A' diminue fortement la biomasse de l'espèce 'B' traduisant une forte compétitivité de l'espèce 'A'. Par contre la diminution est ensuite progressive et tend vers une asymptote horizontale. Ce type de réponse pourrait être celle de l'espèce la moins compétitive que pourrait être le blé dur dans notre situation. Néanmoins, l'évolution de la biomasse d'une espèce A en fonction de celle de l'espèce B est certainement ni linéaire, ni concave, ni convexe mais doit correspondre à des modèles complexes comme par exemple ceux décrits par les courbes D ou E (**Figure 27**). Dans ces situations, la diminution de la biomasse d'une espèce avec l'accroissement de la biomasse de l'espèce associée se fait de façon non homogène, suggérant qu'il existe des seuils de compétition pour lesquels l'effet est plus ou moins fort sur la production de biomasse. Les courbes des modèles D ou E ont au moins 5 paramètres ce qui ne nous permet pas, à partir de notre jeu de données, de les estimer correctement sans risquer de se situer dans un minimum local ou d'être en situation de sur-paramétrage.

Nous avons mis en évidence des relations similaires en représentant la matière sèche des espèces en association en fonction du rapport des densités. Plus la proportion de l'espèce 'A' par rapport à l'espèce 'B' est élevée plus la production de biomasse de l'espèce 'A' sera importante et celle de l'espèce 'B' faible. Cette relation permet, en première approximation et dans notre situation (avec les densités de plantes obtenues), de mettre en évidence l'effet de la densité qui semble avoir été un élément déterminant de la performance des associations lors de ces trois années d'expérimentations. A la différence de l'étude *a posteriori* des biomasses finales, le modèle proposé permettrait de prévoir la production de matière sèche de chaque espèce dans le mélange à partir du semis et du rapport de densité. C'est particulièrement intéressant dans le but d'aider au pilotage de ces systèmes.

Malgré tout, cela suppose d'avoir un modèle valide et généralisable au-delà de la gamme de densités évaluées expérimentalement. Par conséquent, le choix de modèles linéaires pour représenter la production de biomasse des espèces en association en fonction de la biomasse de l'espèce associée ou du rapport de densité est discutable et ceci pour plusieurs raisons :

- Tout d'abord, notre ajustement est biaisé par la distribution du nuage de points. On observe effectivement que celui-ci est composé de deux groupes, un premier pour lequel les rapports de densité entre blé dur et féverole d'hiver sont compris entre 3 et 6 et un second nuage avec quelques points pour lesquels les rapports sont compris entre 8 et 10. Par conséquent, en l'absence de continuité entre ces deux nuages notre ajustement est quelque peu discutable et ceci bien qu'il soit significatif.

- Par ailleurs, la gamme de densités testées ne permet pas d'extrapoler nos résultats au-delà de ces valeurs et notamment parce qu'un ratio $\frac{Densité\ de\ Blé\ en\ IC}{Densité\ de\ Féverole\ en\ IC} = 6$ par exemple, peut-être obtenu aussi bien avec 120 plantes de blé dur et 20 plantes de féverole d'hiver qu'avec 60 plantes de blé dur et de 10 plantes de féverole d'hiver.

- D'autre part, notre modèle ne considère que l'effet de la densité alors que le rapport entre compétitions inter- et intraspécifiques (qui détermine la performance des deux espèces dans le mélange), dépend également de l'agencement spatial des deux espèces.

- Enfin, comme précédemment et par souci de simplicité et d'efficacité, nous avons choisi un modèle linéaire pour représenter l'évolution de la biomasse avec le rapport de densité alors que ce modèle n'est pas forcément linéaire.

II.5 Conclusion

Nos résultats ont permis de montrer que l'association blé dur – féverole d'hiver est performante à plus d'un titre : elle permet d'améliorer l'utilisation des ressources du milieu, en particulier l'azote, pour la production de biomasse et de rendement ; elle permet également d'améliorer significativement la teneur en protéines du blé dur par rapport aux cultures monospécifiques, et ce d'autant plus que le rendement du blé dur en association est faible.

Cependant, nos résultats ont montré que la performance de ces systèmes dépend fortement du rapport entre les densités de féverole d'hiver et de blé dur. Plus précisément, ces systèmes sont performants dès lors que la densité de féverole d'hiver n'est pas trop importante sans quoi la biomasse du blé dur se trouve fortement réduite, en particulier à partir du début de la floraison de la féverole d'hiver, et par conséquent le rendement de la céréale s'en trouve limité. Etant donné la faible densité de la féverole d'hiver on comprend aisément qu'une augmentation de seulement quelques plantes de légumineuses par mètre carré aura des conséquences fortes sur la production du blé dur. Or, les différences entre densités de semis et densité de levée sont parfois importantes ce qui pose une question majeure quant à l'optimisation de ces systèmes et à leur pilotage.

Comme nous l'avons évoqué précédemment, la performance des associations réside dans l'équilibre entre compétitions inter- et intraspécifiques. Ainsi, afin de réduire le risque d'un accroissement des compétitions interspécifiques de la féverole d'hiver sur le blé dur, en particulier à partir du début de la floraison de la féverole d'hiver, il pourrait être intéressant de jouer sur l'écartement entre les rangs de féverole d'hiver. A titre d'exemple, dans une association où la densité de la féverole d'hiver est par exemple de 12 plantes m^{-2} les compétitions interspécifiques (effet de la féverole d'hiver sur le blé dur et vice versa) seront plus fortes et les compétitions intraspécifiques (effet de la féverole d'hiver sur la féverole d'hiver) plus faibles dans le cas où les rangs de féverole d'hiver seraient espacés de 29 cm que dans le cas où cet espacement serait de 58 cm. En effet, dans le premier cas la densité de féverole d'hiver sur le rang serait de 3.5 plantes par mètre linéaire contre 7 plantes par mètre linéaire dans le second cas.

Par conséquent, nous pensons qu'il est important de réaliser un travail spécifique sur l'évaluation des densités et de l'agencement spatial des associations blé dur – féverole d'hiver dans le but d'optimiser ces systèmes. Il est également important de considérer le levier variété de féverole d'hiver qui présente une forte variabilité dans les génotypes proposés au catalogue et notamment d'un point de vue de leur hauteur et de leur structure foliaire.

CHAPITRE IV

ETUDE DES DYNAMIQUES, COMPETITIONS ET COMPLEMENTARITES ENTRE ESPECES DANS LES ASSOCIATIONS BLE DUR – POIS D'HIVER

I. Dynamiques, compétitions et complémentarités entre espèces pour l'utilisation de la lumière et de l'azote dans les associations blé dur – pois d'hiver sont déterminées par la disponibilité en azote.

Species dynamics, competition and complementarity for light and N use in a durum wheat – winter pea intercrop are determined by nitrogen availability.

Article en seconde révision à Plant and Soil (accepté sous réserve de modifications).

Résumé

Nous avons montré précédemment que l'association blé dur – pois d'hiver pouvait augmenter la production de matière sèche, le rendement et l'absorption d'azote dans les systèmes à bas niveaux d'intrants azotés. L'objectif de la présente étude était de comprendre comment ces résultats étaient obtenus en analysant les dynamiques des espèces en association pour la production de matière sèche, l'acquisition de l'azote et l'utilisation de la lumière. Une expérimentation a été réalisée au cours de deux années dans le Sud-Ouest de la France avec différents niveaux de fertilisation azotés afin de comparer du blé dur (*Triticum turgidum* L., cv. Nefer) et du pois d'hiver (*Pisum sativum* L., cv. Lucy) cultivés seuls ou en association substitutive en rang. Lorsque la disponibilité en azote minéral du sol était faible durant le début du cycle l'association était 17% et 32% plus efficace que les cultures « pures » pour respectivement la production de matière sèche et l'acquisition de l'azote. Les avantages de l'association étaient essentiellement dû à : i) une meilleure utilisation de la lumière (jusqu'à 10%) grâce aux différences de LAI des deux espèces et à leur dynamique de croissance en hauteur, ii) la dynamique complémentaire des deux espèces pour l'utilisation de l'azote (augmentation de la fixation symbiotique de la légumineuse en association) et iii) un meilleur statut azoté du blé dur au cours de sa croissance. A contrario, l'association est moins performante que les cultures « pures » lorsque la disponibilité en azote est importante dans les stades précoces en raison du fait que l'azote induit une croissance rapide de la croissance de la céréale en hiver et au début du printemps qui réduit la quantité de lumière absorbée par le pois d'hiver et donc sa production de matière sèche.

I.1 Introduction

Adapted from original manuscript

Species interactions are complex, varying with, for example, nutrient availability, environmental factors and time (Connolly et al. 1990). Thus, IC competition studies cannot base their conclusions on data from just one single final harvest of crops grown at one level of N, for example (e.g. Dhima et al. 2007). The aim of this paper was therefore to analyse the dynamics leading to the final outcome of a durum wheat – winter pea IC such as the proportion of species, the total grain yield and the complementary use of N by components. This analysis should provide the knowledge needed to propose optimal strategies for improving the management of durum wheat – winter pea cropping sequences. This paper focuses on species dynamics under different N availabilities modified by N fertilization (quantity and splitting of doses) in a durum wheat – winter pea IC compared to SC. This was achieved through 2 field experiments comparing IC and SC with different soil N availabilities. We analysed throughout the intercrop growth: i) species growth dynamics and canopy architecture (green LAI and plant height), ii) N and light use and iii) the setting up of potential advantages for dry weight, N acquisition and wheat nitrogen nutrition status.

I.2 Materials and methods

Adapted from original manuscript

I.2.1. Site and Soil

The experiment was carried out on the experimental fields of the Institut National de la Recherche Agronomique station in Auzeville (SW France, 43°31'N, 1°30'E) in 2005-2006 (Exp. I) and 2006-2007 (Exp. II) see **Chapter II, Part IV** for details.

I.2.2. Experimental design

Durum wheat (W) (*Triticum turgidum* L, cv. Nefer, authority Eurodur) and winter pea (P) (*Pisum sativum* L., cv. Lucy, authority GAE recherche) were grown as SC and as IC in a row replacement design see **Chapter II, Part II** for details.

In both experiments, different fertilizer-N sub-treatments were evaluated on W-SC and IC while P-SC was grown only without any N application see **Chapter II, Part II** for details. Mineral N available throughout crop growth was estimated at 90, 168 and 223 kg N ha^{-1} for N0, N100 and N180 treatments respectively in Exp. I and 94, 144, 150 and 171 kg N ha^{-1} for N0, N60+, N80 and N140 treatments in Exp. II (for details, see **Chapter III, Part I** for details).

The experimental layout for both experiments was a randomized split-plot design with N application as main plots and crops as subplots, with five replicates in Exp. I (4 for wheat SC in N0 and IC in N180) and three replicates in Exp. II (5 for Pea SC) see **Chapter II, Part II** for details.

I.2.3. Measurements and analysis

Four samplings were carried out during the growing season at key development stages (**Figure 28**) see **Chapter II, Part III** for details.

The photosynthetically active radiation (PAR, 400-700 nm wavebands) was measured using a 30 cm long line sensor PAR-80 (Decagon Devices Inc., Washington, USA) orientated

perpendicularly to the rows. Incident PAR on the top of the canopy (PAR_0) and PAR transmitted to the soil (PAR_T) were measured orienting sensor towards the sky. On the other hand, PAR reflected by the 'soil-crop' system above the canopy (PAR_R) and PAR reflected from the bare soil (PAR_{RBS}) were measured orienting the sensor towards the soil at a distance of 30 cm from the surface (canopy or soil). Data were collected regularly throughout the growing period between 13.00 and 14.00 (GMT+01:00) and only when the sky was totally clear.

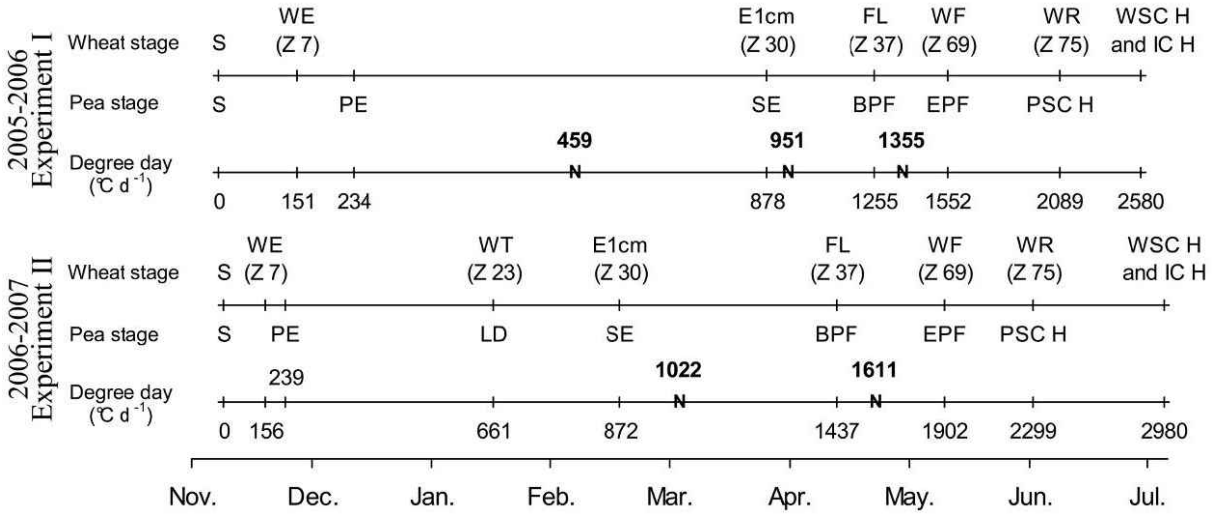


Figure 28 *Major stages and sampling dates which occurred during the experimental periods represented on a calendar scale coupled with a degree day scale (base 0°C) scale: sowing (S), wheat emergence (WE), pea emergence (PE), wheat tillering stage (WT), pea leaf development (LD), '1 cm ear' stage of wheat (E1cm), beginning of pea stem elongation (SE), 'visible flag leaf' stage of wheat (FL), beginning of pea flowering (BPF), wheat flowering (WF), end of pea flowering (EPF), wheat ripening (WR), final harvest for pea sole crop (PSC H) and final harvest for wheat sole crop and intercrop (WSC and IC H). Wheat stages are indicated with a 'Z' (for Zadoks scale) followed by the number of the stage e.g. 'Z 30'. Dates of fertilizer-N application are indicated with a bold 'N' for both experiments.*

I.2.4. Calculations

The fraction of PAR absorbed by the crop (F_{PARa}) was calculated using the following equations (Hodges and Kanemasu 1977):

$$F_{PARa} = \left(\frac{PAR_0 - PAR_T - PAR_R + PAR_{RS}}{PAR_0} \right)$$

$$PAR_{RS} = PAR_T \times T_S$$

$$T_S = \frac{PAR_{RBS}}{PAR_0}$$

where PAR_0 is the incident PAR above the canopy, PAR_T the PAR transmitted to the soil, PAR_R the PAR reflected by the 'soil-crop' system above the canopy, PAR_{RS} the PAR reflected from the soil, T_S the fraction of PAR_T reflected from the soil and . PAR_{RBS} the PAR reflected from the bare soil. The fraction of PAR absorbed by the crop was regressed against thermal time from emergence to wheat flowering using a logistic model:

$$F_{PARa} = F_{PAR\max} \times \frac{\exp(K1 \times (t - K2))}{1 + \exp(K1 \times (t - K2))}$$

where F_{PARmax} is the maximum value of F_{PARa} when thermal time approaches positive infinity, K2 the thermal time at the point of inflexion (where F_{PARa} is half of F_{PARmax}), K1 the slope of the curve at the point of inflexion and t the thermal time. Parameters were calculated in order to minimize the root mean square error.

PAR absorbed by the canopy (PARa) was then calculated as the sum of daily PAR energy absorbed (dPARa) from emergence (day 1) to the last measurement (day n) corresponding to 10 and 5 days before wheat flowering in Exp. I and II respectively:

$$PARa = \sum_{i=1}^{n} dPARa_i = \sum_{i=1}^{n} 0.48 \times SR_i \times F_{PARai}$$

where SR_i is the total incident solar radiation (MJ m^{-2}) obtained from the meteorological station on day i, F_{PARai} the fraction of PAR absorbed by the crop on day i (calculated from the logistic model) and 0.48 the fraction of PAR of the total solar radiation energy (Varlet-Grancher et al. 1982).

The land equivalent ratio (LER) is defined as the relative land area required when growing SC to produce the dry weight (LER_{DW}), the yield (LER_Y) or the N accumulated in shoots (LER_N) achieved in IC (Willey 1979a). LER for a wheat – pea IC is the sum of the partial LER values for wheat (LER_W) and pea (LER_P) (De Wit and Van Den Bergh 1965). LER was calculated for each sampling in order to analyse the dynamics of resource use for wheat and pea. Calculations, assumptions and significance are given in a previous paper (see **Chapter II, Part V** for details). By analogy, we also calculated the LER by considering the PAR absorbed by the canopy (LER_{PAR}) as follows:

$$LER_{PAR} = \frac{2 \times PARa_{IC}}{PARa_{P-SC} + PARa_{W-SC}}$$

where $PARa_{IC}$, $PARa_{P\text{-}SC}$ and $PARa_{W\text{-}SC}$ are the PAR absorbed by the whole IC, the SC pea and the SC wheat respectively.

The nitrogen nutrition index (NNI) – an indicator of crop N nutrition status which reveals a possible N deficiency in the crop at the time of observation – is defined as the ratio between the actual crop N concentration in shoots (%Nact) and the critical crop N concentration in shoots (%Nc) i.e. the minimum N concentration in shoots that allows the maximum shoot biomass production (Lemaire and Gastal 1997):

$$NNI = \frac{\%Nact}{\%Nc}$$

%Nc for a SC winter wheat ($\%Nc_{W\text{-}SC}$) is defined by the critical nitrogen dilution curve proposed by Justes et al. (1994):

$$\%Nc_{W-SC} = 4.4\% \text{ if } DW_{W\text{-}SC} < 1.55 \text{ t ha}^{-1} \text{ else } 5.35 \times DW_{W\text{-}SC}^{-0.442}$$

where $DW_{W\text{-}SC}$ is the shoot dry weight per unit area achieved in SC for wheat. In intercrops, the biomass of the neighbouring species has to be taken into account because it contributes to: i) the canopy light capture and to light attenuation and ii) the N dilution according to growth and stages. Hence, Soussana and Arregui (1995) proposed to calculate %Nc for an intercrop using its total biomass. Thus, for the intercropped wheat we used the following equation:

$$\%Nc_{W-IC} = 4.4\% \text{ if } DW_{IC} < 1.55 \text{ t ha}^{-1} \text{ else } 5.35 \times DW_{IC}^{-0.442}$$

where DW_{IC} is the shoot dry weight per unit area of the whole IC (pea + wheat). A value of NNI of at least 1 indicates that crop growth was not limited by N supply at this time. Conversely, when NNI < 1, it indicates that N was limiting for crop growth at that date.

I.2.5. Statistics

Analysis of variance was carried out using the AOV procedure of the 2.7.1 version of R software (R development Core Team 2007) for each year and date of sampling separately, considering N treatments as the main factor, crops as a sub-factor and interaction between N treatments and crops. All data were tested for normal distribution using the Shapiro-Wilk test and pairwise comparisons were performed using a two-tailed t-test (P=0.05 or P=0.10) to compare N treatments within crops and crops within N treatments. According to Sheskin (2004), the significance of differences between treatments can be estimated using simple planned comparisons when these have been planned beforehand, regardless of whether or not the omnibus F value is significant. Finally, confidence intervals for the means of LER values and partial LER values were calculated from replicates assuming normal distribution according to Sheskin (2004) in order to compare the means of LER with 1 and partial LER values with 0.5.

I.3 Results

I.3.1. Growth dynamics

I.3.1.1. Emergence and plant density

For both experiments, wheat emerged earlier than pea and the percentage emergence of wheat was lower than that of pea (63% and 76% respectively). On average for both species, the emergence was similar for the two experiments (70% and 66% for Exp. I and II respectively) but it was slower in Exp. II. Moreover, for both species, no significant difference ($p>0.10$) was found between SC and IC. Finally, plant densities were 51, 27, 226 and 112 plants m^{-2} for pea SC, pea IC, wheat SC and wheat IC respectively in Exp. I and 56, 27, 202 and 101 plants m^{-2} for pea SC, pea IC, wheat SC and wheat IC respectively in Exp. II.

I.3.1.2. Leaf area index

SC and IC wheat GLAI increased (**Figure 29**) from emergence to reach a maximum around the beginning of pea flowering (BPF) and thereafter declined. Conversely, between BPF and wheat flowering (WF), SC and IC pea GLAI increased or remained constant and afterwards declined very rapidly. Pea GLAI reached nil at 1700 and 2050 °C d^{-1} AWE for Exp. I and II respectively while wheat GLAI was still positive. We observed more compressed GLAI dynamics over time during Exp. I.

At wheat E1cm stage corresponding to the beginning of pea stem elongation (**Figure 29**), GLAI of the whole IC was comparable to that of wheat SC and slightly greater than that of pea SC ($p<0.10$). From E1cm to WF, GLAI of the whole IC was less than that of pea SC ($p<0.10$) but greater than that of wheat SC ($p<0.10$) particularly with low N fertilization. Moreover, for both experiments, SC and IC wheat GLAI were increased with N fertilization, in particular from E1cm to BPF. Conversely, in Exp. I no difference between N treatments was observed for the IC pea GLAI while in Exp. II the maximum was obtained for N0. Thus the whole GLAI of IC was slightly affected by N fertilization.

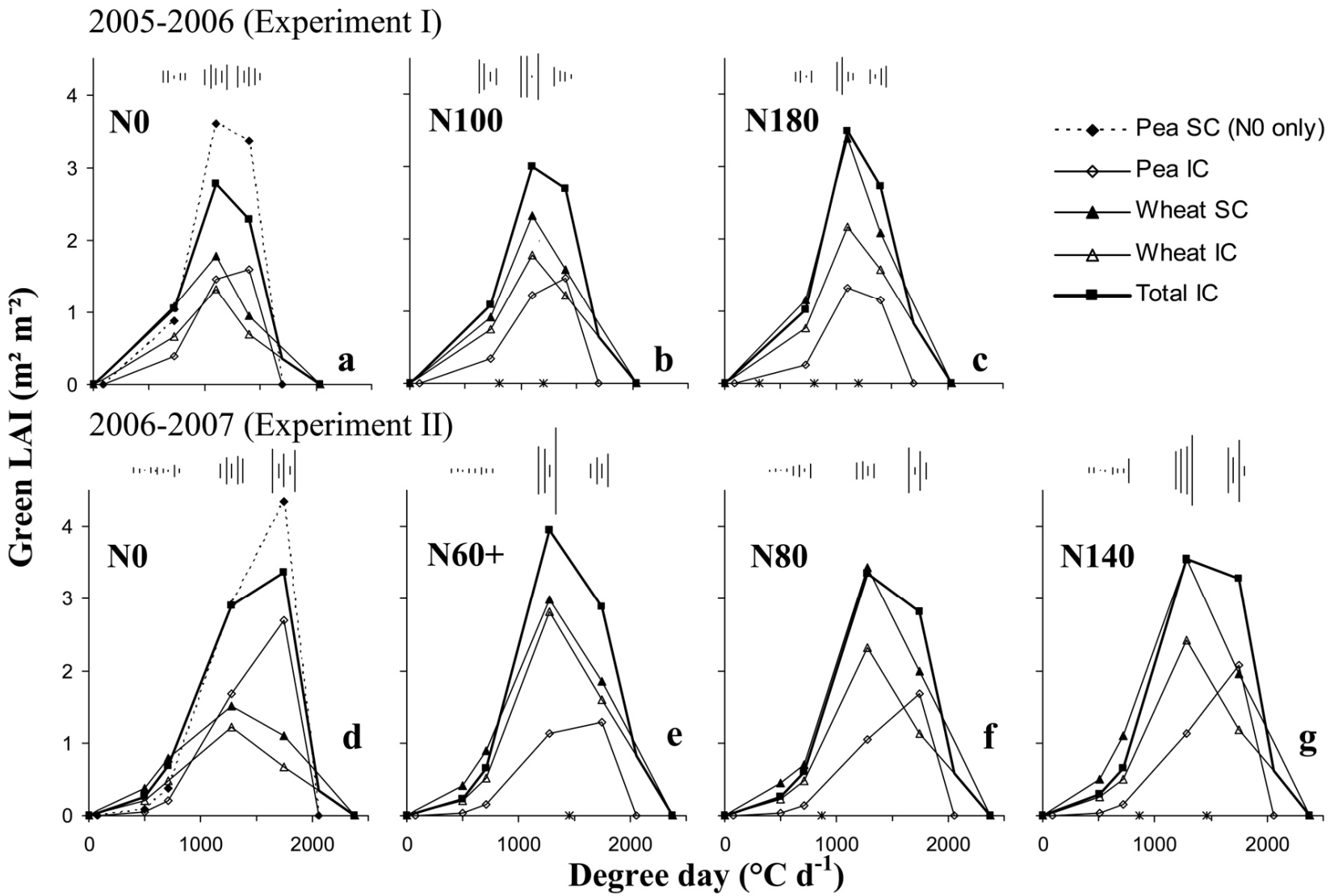


Figure 29 *Dynamics of green leaf area index (GLAI) of sole crops (SC) and intercrops (IC) of pea and wheat for the different N treatments (Nx where 'x' represents N applied in kg N ha^{-1}) and dates of sampling. Values are means (n=3 to 5). For each date of sampling, vertical bars on the top of the figure correspond to standard deviation of the total IC, Wheat IC, Pea IC, Wheat SC and Pea SC (N0 only) respectively. Asterisks on the x-axis correspond to fertilizer N application.*

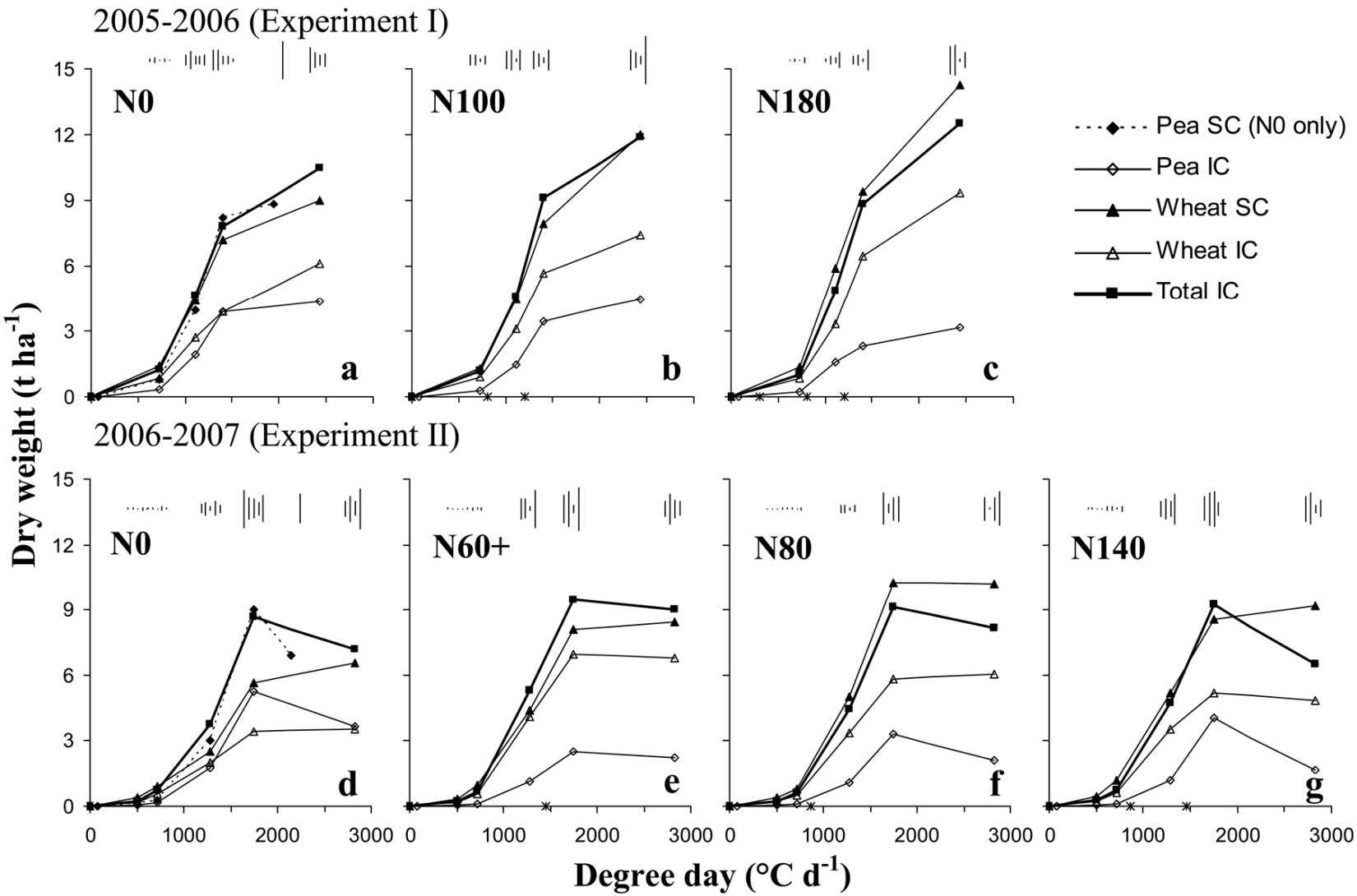


Figure 30 *Evolution of total shoot dry weight (DW) production in t ha^{-1} of sole crops (SC) and intercrops (IC) of pea and wheat for the different N treatments (Nx where 'x' represents N applied in kg N ha^{-1}) and dates of sampling. Values are means (n=3 to 5). For each date of sampling, vertical bars on the top of the figure correspond to standard deviation of the total IC, Wheat IC, Pea IC, Wheat SC and Pea SC (N0 only) respectively. '*' on the x-axis indicate fertilizer N application.*

I.3.1.3. Dry weight production

Crop growth in absolute terms was very slow until E1cm and increased rapidly from E1cm to WF, particularly between BPF and WF. Then in Exp. I, from WF to maturity, wheat SC DW was greatly increased, in particular when N fertilizer was applied, while SC and IC pea DW remained stable. On the other hand, in Exp. II, no significant increase in crop DW was observed from WF to H and more surprisingly, SC and IC pea DW decreased, in particular for N0 and N140. Consequently, from WF to H, IC DW decreased for the N0 and N140 treatments (Exp. II), remained constant for N60+ and N80 (Exp. II) and increased in Exp. I.

During crop growth, SC and intercropped wheat DW significantly increased with fertilizer N amount in Exp. I (**Figure 30**). Conversely, in Exp. II, SC wheat DW at harvest significantly increased ($p<0.10$) from N0 to N80 while IC wheat DW was highest in N60+ and clearly lowest in N0. For both experiments, IC pea DW was significantly reduced with fertilizer-N ($p<0.05$) compared to N0, in particular for N180 (Exp. I) and N140 (Exp. II).

As a consequence, in Exp. I, total IC DW was increased when fertilizer N was applied but no significant difference was found between N treatments 100 and N180. In Exp. II the highest was in N60+ and the lowest in N140. Finally, wheat and pea SC DW were always significantly greater ($p<0.10$) than their corresponding IC DW but lower than that of the total IC DW when little or no fertilizer N was applied (N100 in Exp. I and N60+ in Exp. II). Conversely, increasing the amount of fertilizer N (N180 in Exp. I, N80 and N140 in Exp. II), the SC wheat produced significantly more DW than the whole IC ($p<0.10$).

I.3.1.4. Growth in height

Wheat and pea differed in their height, but this difference changed over time (**Table 13**). Until E1cm, pea growth in height was very slow for both SC and IC and pea was clearly shorter than wheat (8 and 25 cm respectively on average for all N treatments). For that period no difference in height was found between IC and SC covers or between N fertilizer treatments. Then, from E1cm to BPF, pea growth in height was faster than that of wheat and no difference was found between pea and wheat height at BPF. Moreover, no difference was found at BPF between IC wheat and SC wheat and between N treatments and similar results were observed for pea in Exp. I.

On the other hand, in Exp. II, peas were shortest in SC, tallest in fertilized IC and intermediate for the unfertilized IC at BPF. Finally, at WF, wheat was again taller than pea and no difference was found between IC and SC canopy height. However, N fertilization increased wheat height by 7 cm on average for SC and IC but did not affect pea. No wheat lodging was observed except after wheat flowering in N140 (Exp. II) for the SC. Moreover, no pea lodging was observed in IC although this occurred in SC for both experiments, with a high proportion in Exp. II.

		2005-2006 (Experiment I)				2006-2007 (Experiment II)			
		N0		N		N0		N	
		SC	IC	SC	IC	SC	IC	SC	IC
E1cm	Wheat	25 ± 0	26 ± 2	25 ± 0	27 ± 3	23 ± 0	23 ± 2	25 ± 0	23 ± 4
	Pea	10 ± 0	10 ± 0		10 ± 0	6 ± 1	8 ± 1		5 ± 0
BPF	Wheat	58 ± 2	55 ± 1	62 ± 4	61 ± 3	45 ± 4	47 ± 2	54 ± 4	57 ± 2
	Pea	56 ± 4	55 ± 5		58 ± 3	41 ± 3	47 ± 2		52 ± 3
WF	Wheat	70 ± 0	70 ± 0	77 ± 3	75 ± 4	92 ± 7	91 ± 6	100 ± 2	98 ± 2
	Pea	63 ± 3	60 ± 0		66 ± 6	76 ± 4	73 ± 5		74 ± 2

Table 13 *Canopy height (cm) of sole crops (SC) and intercrops (IC) measured at '1 cm ear' stage of wheat (E1cm), beginning of pea flowering (BPF) and wheat flowering (WF) for the unfertilized plots (N0) or considering the mean of all N treatments. Values are the mean of (n=3 to 5) ± standard error.*

	2005-2006 (Experiment I)							2006-2007 (Experiment II)								
	N0			N100		N180		N0			N60+		N80		N140	
	IC	W SC	P SC	IC	W SC	IC	W SC	IC	W SC	P SC	IC	W SC	IC	W SC	IC	W SC
$K1*10^5$	743	923	1030	693	665	767	757	809	813	967	834	711	960	1018	927	769
K2 (°C)	671	569	782	653	581	652	589	842	755	967	865	813	832	790	826	764
F_{PARmax} (%)	89	74	93	91	83	93	87	86	73	91	94	90	93	92	94	97
PAR absorbed (MJ m^{-2})	342	333	289	359	366	369	380	400	373	367	427	432	441	457	450	486
RMSE (%)	3.1	2.1	1.8	1.9	2.3	2.7	3.3	1.6	2.4	1.3	2.6	1.6	2.9	3.6	1.7	1.6
Bias (%)	-0.2	-0.1	0.4	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	0.2	0.2	0.4	0.3	0.1	0.2	0.6	0.3	0.2
LER_{PAR}	1.10			1.10		1.10		1.08			1.07		1.07		1.06	

Table 14 *Values of fitted parameters, cumulative PAR absorbed, root mean square error, bias and PAR land equivalent ratio calculated from the logistic model:* $F_{PARa} = F_{PAR\max} \times \frac{\exp(K1 \times (t - K2))}{1 + \exp(K1 \times (t - K2))}$ *for the whole intercrop (IC), pea sole crop (P SC) and wheat sole crop (W SC) for the different N treatments (Nx where 'x' represents N applied in kg N* ha^{-1}*).*

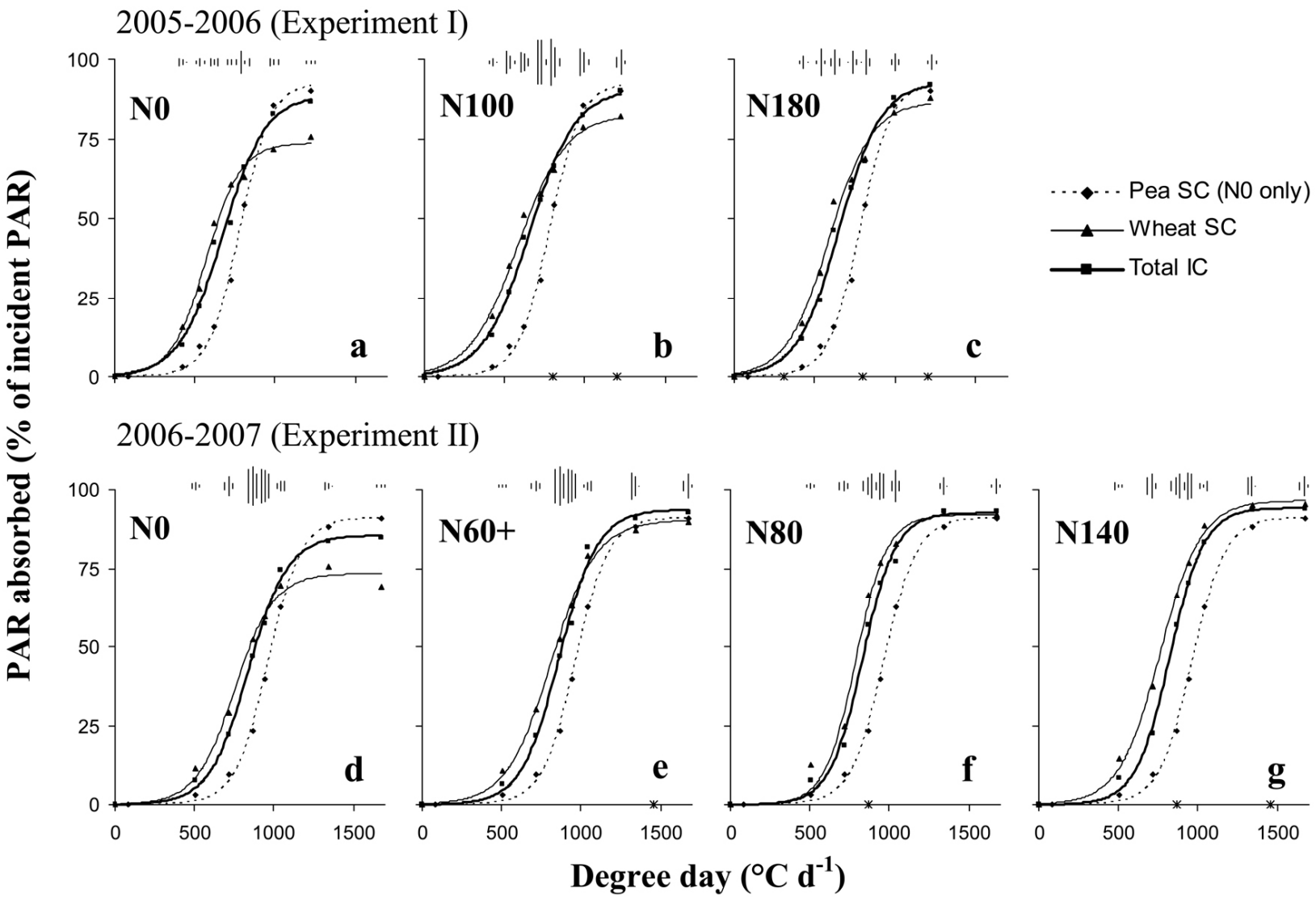


Figure 31 *Evolution of the PAR fraction absorbed of sole crops (SC) of pea or wheat and of the whole intercrop (IC) measured throughout crop growth for the different N treatments (Nx where 'x' represents N applied in kg N ha^{-1}). Values are means (n=3 to 5) and curves are regressed non-linearly against thermal time using the following logistic model:*

$$F_{PARa} = F_{PAR\max} \times \frac{exp(K1 \times (t - K2))}{1 + exp(K1 \times (t - K2))}$$

For each date of sampling, vertical bars on the top of the figure correspond to standard deviation of the total IC, Wheat SC and Pea SC (N0 only) respectively. '' on the x-axis indicate fertilizerN application.*

I.3.2. Resource use dynamics

I.3.2.1. Light absorption

The fraction of PAR absorbed (F_{PARa}) by SC and the whole IC increased with crop growth from emergence to WF following a logistic model (**Figure 31**). RMSE values (**Table 14**) were very low (3.6% at maximum) and the bias nil (0.6% at maximum) indicating a good fit of the model. Parameter values of the logistic model (**Table 14**) indicate that the thermal time at the point of inflexion (K2) of the pea SC is greater than that of the IC, itself higher than that of wheat SC. The slope of the curve at the point of inflexion (K1) was highest for the pea SC and that of the IC was higher than the wheat SC only for N60+ and N140 (Exp. II).

For all N treatments, F_{PARa} of the whole IC was greater than for pea SC and slightly less than for wheat SC until E1cm. Then, for N0 and from E1cm to WF, F_{PARa} of pea SC was higher than for IC, itself greater than wheat SC (**Figure 31**). Conversely, when N fertilizer was applied, F_{PARa} of pea SC was the smallest and a slight difference was observed between IC and wheat SC from E1cm to WF. Finally, in N fertilized treatments, F_{PARmax} values (**Table 14**) of the IC, wheat SC and pea SC were more or less similar.

PAR absorbed from sowing to WF was the lowest for the pea SC and the highest for the wheat SC except for N0 where the maximum was observed for the whole IC. As a consequence, LER_{PAR} in IC were always above 1 for both experiments and all N treatments (1.08 on average) whatever the weather or the amount and date of N application.

I.3.2.2. Nitrogen acquisition

As expected, SC wheat N accumulation was positively correlated with N fertilization in both experiments (**Figure 32**). Similar results were obtained for the IC wheat N accumulation in Exp. I, while in Exp. II the highest was obtained with N60+ and the lowest with N0. N accumulated by crops increased throughout the growth period in Exp. I but in Exp. II SC and IC wheat N uptake remained more or less stable between WF and maturity and pea IC N acquisition decreased. Without N fertilizer, the SC pea always accumulated significantly ($p<0.10$) more N in shoots than the SC wheat and than the whole IC. In N-fertilized plots, the whole IC accumulated more N than the SC pea in Exp. I, but a similar or smaller amount in Exp. II, mainly due to the decrease in the IC pea's accumulated N. The IC as a whole always accumulated more N than the SC wheat and the difference was reduced and became non-significant ($p>0.10$) with the increase in N availability (N180 in Exp. I and N140 in Exp. II). Finally, the IC wheat accumulated more than 50% as much N as the SC wheat and the higher the N availability, the bigger was the difference between IC and SC wheat N accumulated all over the growing period.

I.3.3. Intercropping advantages

I.3.3.1. Dry weight land equivalent ratio

At the four key stages sampled (E1cm, BPF, WF and maturity), LER values calculated from DW (LER_{DW}) were roughly 1 or more in all treatments ($p<0.05$) (**Figure 33**) except for N180 (Exp. I) at E1cm and PF and for N140 (Exp. II) at the final harvest. These results indicate that throughout crop growth, resources were used for DW production up to 36% more efficiently in IC than in SC in low N conditions. On the whole, LER_{DW} values were reduced with N fertilization, particularly for the N180 (Exp. I) and the N140 (Exp. II) treatments mostly because of LER_{DW-P} reduction.

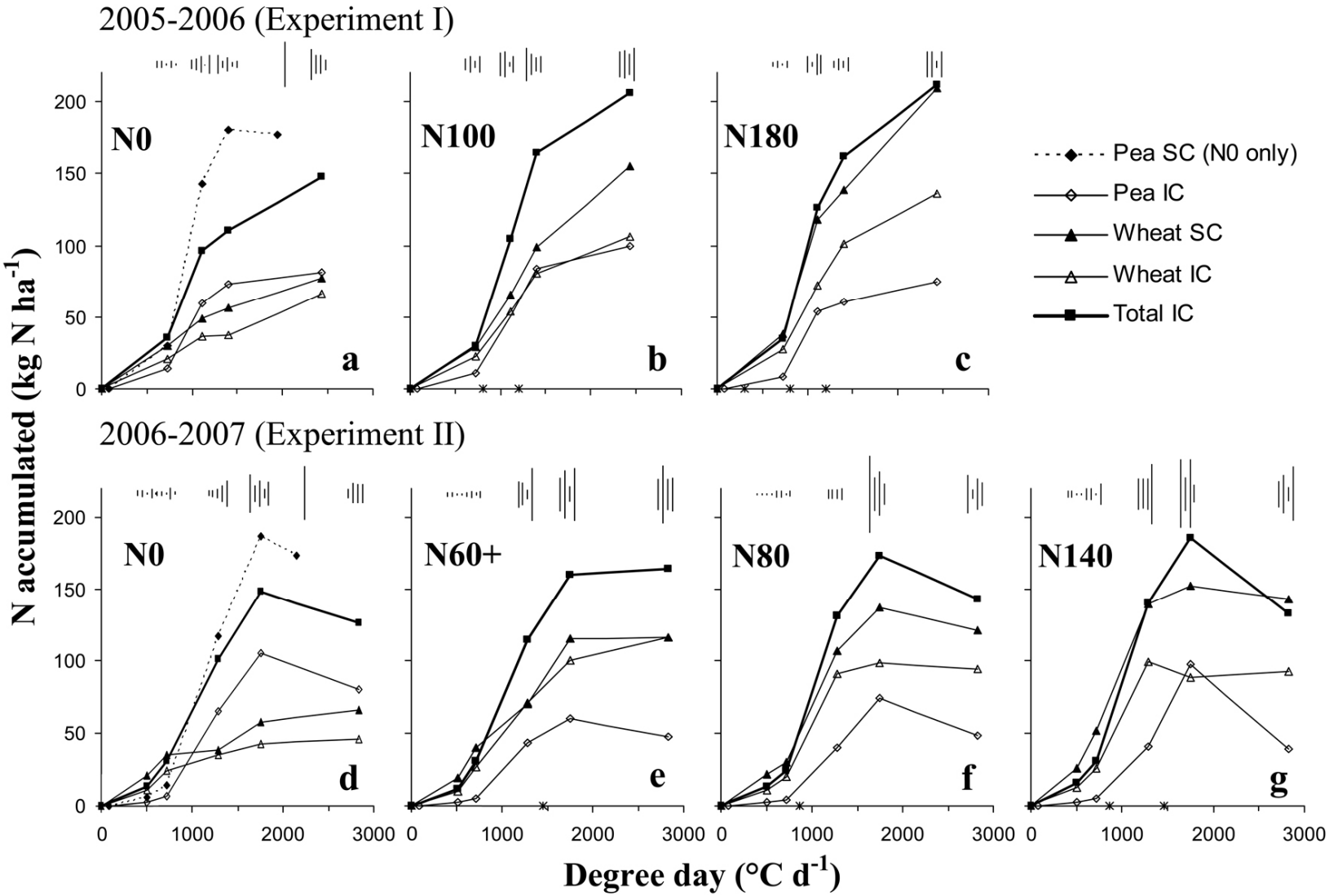


Figure 32 *Total shoot N accumulation in kg N ha^{-1} of sole crops (SC) and intercrops (IC) of pea and wheat for the different N treatments (Nx where 'x' represents N applied in kg N ha^{-1}) and dates of sampling. Values are means (n=3 to 5). For each date of sampling, vertical bars on the top of the figure correspond to standard deviation of the total IC, Wheat IC, Pea IC, Wheat SC and Pea SC (N0 only) respectively. '*' on the x-axis indicate fertilizer N application.*

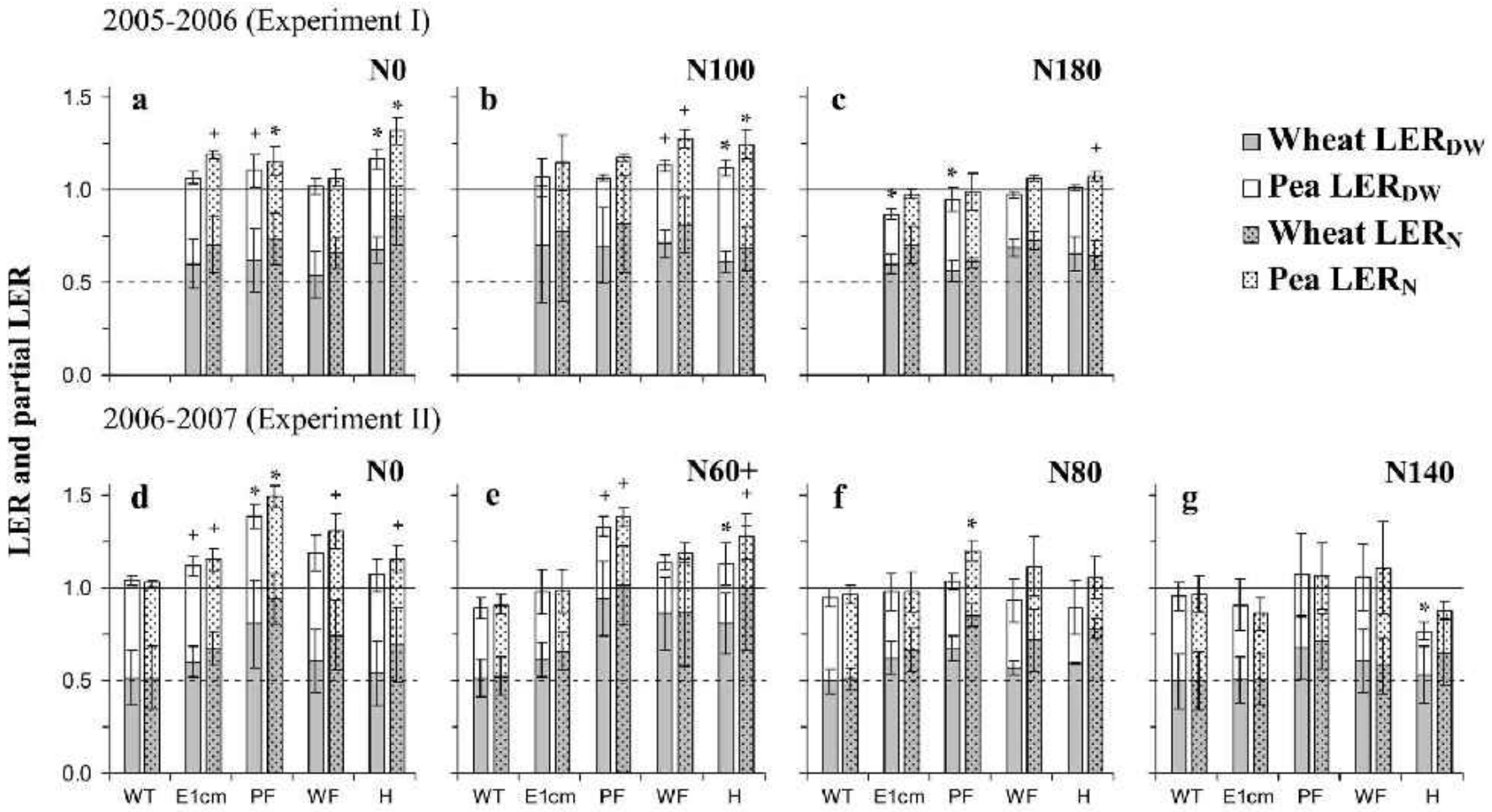


Figure 33 *Partial land equivalent ratio (LER) of wheat and pea calculated from dry weight (LER_{DW}) and N accumulated (LER_N) for the two experiments and N treatments (Nx where 'x' represents N applied in kg N ha^{-1}) for the different dates of sampling: i) wheat tillering (WT), ii) stage '1cm ear' of wheat (E1cm), iii) pea flowering (PF), iv) wheat flowering (WF) and v) harvest (H). Values are the mean (n=3 to 5) ± standard error. Single plus (+) and single asterisks (*) indicate that LER is significantly different from 1 at P=0.10 and P=0.05 respectively. LER values above 1 indicate that the intercrops are more efficient than the sole crops for dry weight and vice versa. Partial LER values below 0.5 indicate that species dry weight (per plant or row) is less in the mixture than in the sole crop (see* ***Chapter II, Part V*** *for details).*

Indeed, LER_{DW-P} values were always equal to or significantly below 0.5 ($p<0.10$), except for N0 in both experiments and for N140 in Exp. II ($p>0.10$). Conversely, for all N treatments and stages, wheat partial LER_{DW} values (LER_{DW-W}) were always at least 0.5 and sometimes much higher ($p<0.10$). Moreover, the proportion of each species changed significantly over time and particularly in Exp. II. Indeed, we observed that LER_{DW-P} values remained more or less stable throughout crop growth, and similar results were found in Exp. I for LER_{DW-W}, while in Exp. II, LER_{DW-W} increased until pea flowering and then decreased, in particular for N0 and N60+.

I.3.3.2. N land equivalent ratio

Whatever the date of sampling or N fertilization, LER values calculated from N accumulated (LER_N) were always higher than that calculated from DW (**Figure 33**). Throughout crop growth, LER_N values were roughly 1 or more in all treatments ($p<0.05$) except for N140 at harvest. This indicates an IC advantage over SC for N acquisition throughout crop growth greater than for DW production. On the whole, LER_N values were reduced with N fertilization, in particular for N180 (Exp. I), N80 and N140 (Exp. II). For all N treatments and stages, wheat partial LER_N values (LER_{N-W}) were always above 0.5 ($p<0.10$) except at E1cm in Exp. I, wheat tillering in Exp. II and for N140 at all stages. On the other hand, LER_{N-P} values were always equal to or below 0.5 and reduced when N fertilizer was applied. Total LER_N values and partial LER_N values changed significantly over time, particularly in Exp. II. Indeed, LER_{N-W} values were increased until pea flowering and then decreased particularly for the N0, N60+ and N80 treatments (Exp. II). Conversely, LER_{N-W} values remained more or less stable in Exp. I throughout crop growth, and similar results were observed for LER_{N-P} values. In Exp. II, LER_{N-P} values were significantly ($p<0.10$) reduced between WF and harvest.

I.3.3.3. Wheat nitrogen nutrition index

In Exp. I, for all N treatments, wheat NNI was always significantly below 1 ($p<0.05$) for both SC and IC (**Figure 34**) indicating a N deficiency throughout the growth period. In Exp. II, NNI of both SC and IC wheat was significantly above 1 ($p<0.05$) at wheat tillering, roughly 1 or slightly less at E1cm stage of wheat and thereafter significantly lower ($p<0.05$) except at the beginning of pea flowering (BPF) in N80 for the IC and in N140 for both SC and IC. The main result is that IC wheat NNI was always at least as high as that of the SC for both experiments and all N treatments, indicating that IC improved wheat N status during the growing season. Without N fertilization wheat NNI of both SC and IC decreased with thermal time, but in Exp. II wheat NNI remains quite stable from BPF to wheat flowering (WF). Each fertilizer-N application increased the wheat NNI or limited its decrease.

I.4 Discussion

I.4.1. Growth dynamics

Various authors have indicated that sequential measurements of crop growth allow a better understanding of the dynamics and mechanisms of competitive interactions in IC and SC compared to a single measurement of final yield (e.g. Connolly et al. 1990; Andersen et al. 2004). In our study we sampled four times during the growing season at key development stages: the following discussion will be largely organized according to these stages. Crop emergence and early growth were slower in Exp. II due to: i) the coarse soil structure, ii) the low soil water content at sowing, only partially compensated by irrigation, and iii) the low winter temperatures. The better start of wheat was mostly the result of faster seedling emergence. In particular, in Exp. II, pea seems to have been more affected by the coarse soil structure and the low soil water content at sowing.

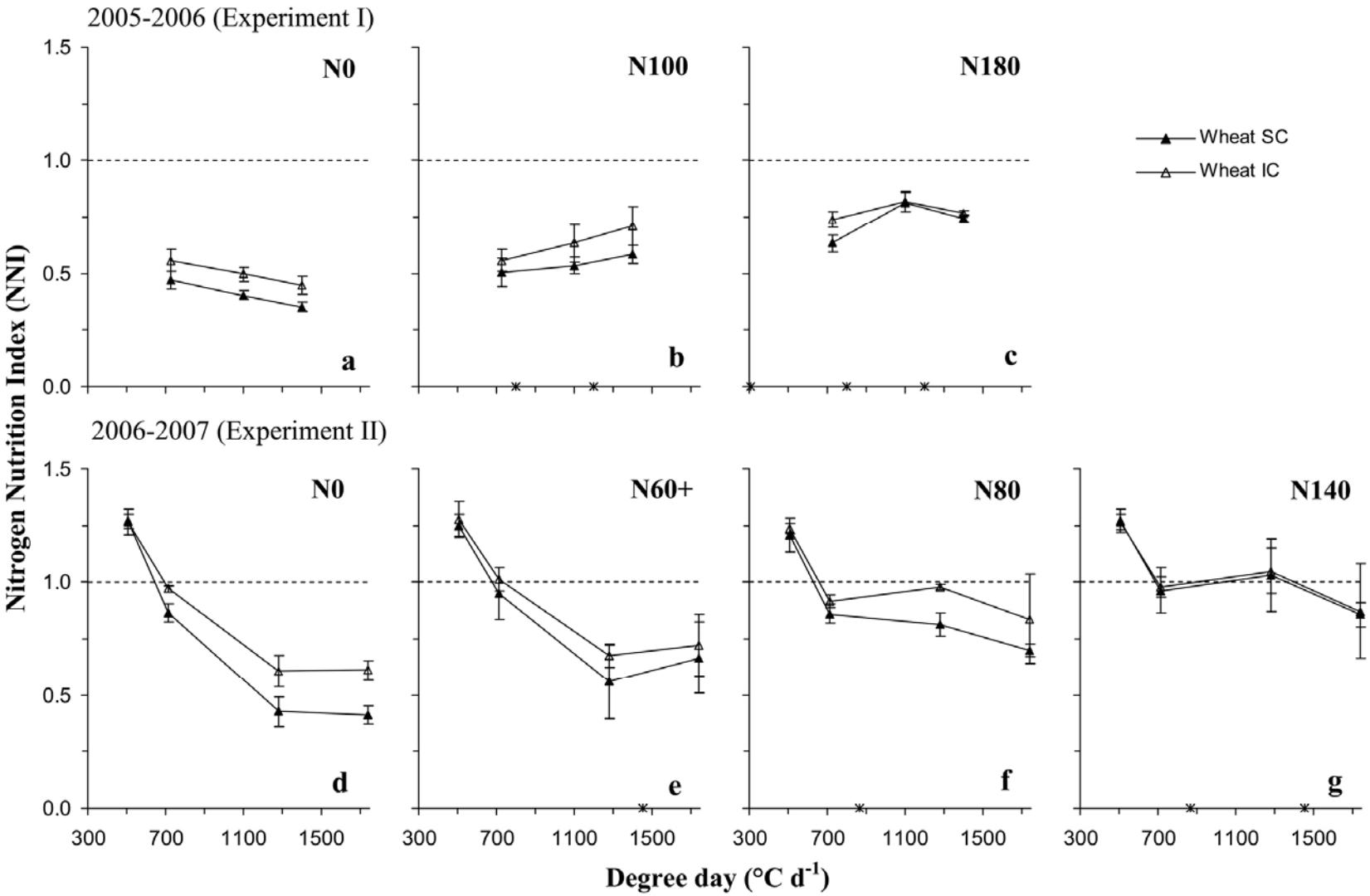


Figure 34 *Nitrogen nutrition index (NNI) of wheat in a sole crop (SC) and intercrop (IC) for the different N treatments (Nx where 'x' represents N applied in kg N ha^{-1}) and dates of sampling. Values are means (n=3 to 5) ± standard error. '*' on the x-axis indicate fertilizer N application. A value of NNI of at least 1 indicates that crop growth was not limited by N supply at this time. Conversely, when NNI < 1, it indicates that N was limiting for crop growth at that date.*

Indeed, pea seeds had a greater water demand than wheat because of greater seed size. Also, in Exp. II particularly, pea emerged later and hence at lower temperatures than wheat. Consequently, the gap between the early growth of the two species was increased. Furthermore, the early advantage to wheat was probably due to faster root growth than pea (Hauggaard-Nielsen et al. 2001a) and to the establishment of nodulation, which is costly in energy and nutrients (Vocanson et al. 2005) and could have reduced early pea growth.

I.4.2. Resource use dynamics

I.4.2.1. Light absorption

According to the Beer-Lambert equation, F_{PARa} and GLAI are not directly correlated because the fraction of PAR absorbed by a crop depends on the total LAI and not just the GLAI. Indeed, the GLAI included the green area of the leaves only, and not all the plant parts contributing to photosynthesis. This indicates that the real area contributing to PAR absorption was probably slightly underestimated, although the contribution from other parts (stems, ears, pods or tendrils) is small and difficult to estimate.

Nevertheless, our results indicate that in early stages of growth, wheat is much more efficient than pea for light absorption, due to its earlier growth, tillering, greater height during winter and higher GLAI. Thus, in early growth, there is certainly less incoming PAR available for the pea in IC because of shading by W, causing some etiolation of the legume and earlier growth in height compared to SC. Then from E1cm to WF the IC as a whole is more efficient for light absorption than SC wheat because of pea light absorption related to the later growth of the legume, in particular without N fertilization. These results are also the consequence of the small effect of senescence on pea light interception because its leaves did not fall, but maintained their orientation and their area was only reduced by 5-10% (Guilioni and Lecoeur 2005).

N fertilization had only a small effect on IC F_{PARa} because F_{PARmax} (**Table 14**) was already close to the potential without N fertilization, indicating good complementary absorption of incoming PAR of the two species under these N conditions. This suggests that IC efficiency in N fertilized plots was mostly due to wheat light absorption related to the effect of N fertilization in increasing wheat DW and markedly reducing pea DW due to light competition. These results are in keeping with the fact that for both experiments, SC and IC wheat GLAI were positively correlated with N fertilization, as already described by many authors for other graminaceous crops (e.g. Gastal et al. 1992; Wilman and Pearse 1984). Unlike spring barley-pea IC (Corre-Hellou 2005), durum wheat – winter pea allows a similar or better use of light compared to SC on average throughout the growth period, especially with low N supply. These conclusions are strengthened by the fact that similar results were obtained for both experiments while weather conditions were very different.

I.4.2.2. Nitrogen acquisition

N accumulated by the IC wheat was at least 50% of that of the SC wheat, particularly until the beginning of pea flowering and when little or no N fertilizer was applied. This confirms that the cereal had access to more soil inorganic N in IC than in SC and that this advantage occurred during early stages and persisted throughout growth. This result is supported by the increase in pea symbiotic N_2 fixation, in agreement with several other studies (e.g. Corre-Hellou 2005; Hauggaard-Nielsen et al. 2003; Corre-Hellou and Crozat 2005; Bedoussac and Justes 2009, **Chapitre III, Part I**). Thus the dynamics of N availability throughout the growth of the IC has a big effect on its N accumulation. Indeed, throughout crop growth, the whole IC always accumulated more N than the SC wheat, particularly when the soil mineral-N content was low during the early stages of IC growth

(until the booting stage of wheat), but less N was accumulated in IC than the SC pea in unfertilized plots. Moreover, N fertilizer (80 kg N ha^{-1}) applied at the beginning of wheat stem elongation clearly lead to a significant and early decrease in pea N accumulation, which is in keeping with a reduction in N_2 fixation (Bedoussac and Justes 2009, **Chapitre III, Part I**) and the opposite with low soil N content. Conversely, when N fertilization was applied at the 'flag leaf visible' stage of wheat where no significant N_2 fixation reduction was found (Bedoussac and Justes 2009, **Chapitre III, Part I**), the IC pea N accumulation was only slightly reduced.

I.4.3. Dry weight and nitrogen acquisition: advantages of intercropping

In our experiments the use of environmental resources for plant growth changed over time, indicating that a crop's ability to exploit resource niches and thereby capture available plant growth resources varies significantly during growth. Throughout crop growth, resources were used up to 36% more efficiently in IC than in SC for DW production in low N conditions. Regardless of N availability, wheat took advantage of IC for DW production more than pea ($LER_{DW\text{-}W} > LER_{DW\text{-}P}$) by using N, light and certainly CO_2 and water more efficiently throughout growth due to its earlier growth, greater height and higher N demand. Moreover, throughout crop growth, IC efficiency for N uptake was greater than for DW production at all levels of N fertilization. LER dynamic analysis indicates that pea took advantage of IC mainly between pea flowering and wheat flowering (near the end of pea grain filling), while wheat took advantage of IC between the beginning of wheat stem elongation (E1cm stage) and pea flowering. Moreover, wheat benefited from N fertilization indirectly by its faster growth, improving light and water capture and hence suppressing pea growth (Ghaley et al. 2005). However, the advantage of IC for wheat compared to SC for DW or N was less when a large amount of N was applied or when N was applied in early stages. As a consequence, the advantage of IC for DW production or accumulated N was maximal under low N fertilization treatments (no or late fertilization) and quite stable. However, under low N supply, we observed that IC species efficiency depends greatly on N fertilization and the experiment. Hence it is quite difficult to predict the final efficiency of each species in the mixture for both DW and N.

Reducing pea lodging is of a great importance in order to obtain good yield. Indeed, pea is very sensitive to lodging, mainly because of diseases like pea ascochyta (*Mycosphaerella pinodes*) which usually attacks the stems. Hence SC pea must be harvested soon after maturity, which may be difficult in bad weather or with severe lodging. In IC, pea maturity occurred around 3 to 4 weeks before wheat and for the reasons given above (lodging, pests and diseases), this can be very prejudicial to the pea harvest efficiency. However, in our conditions, no pea lodging was observed in IC because the legume clings to the wheat with its tendrils, creating a dense and stable network.

I.4.4. Wheat nitrogen nutrition index

Wheat NNI of SC and IC were mostly below 1, in particular in late stages and when little or no N fertilizer was applied, underlining the existence of a nitrogen deficiency in the crop throughout the growing period. However and as expected, the IC wheat NNI was always higher than that of the SC except at wheat tillering or when a large amount of N was applied. This confirms that IC can improve wheat N status compared to SC in particular with little or no N fertilizer. Moreover, IC advantage over SC seemed to increase throughout the growth period due to higher N available per wheat plant.

This result is supported by the high pea symbiotic N_2 fixation rate in IC, in agreement with several other studies (e.g. Corre-Hellou 2005; Hauggaard-Nielsen et al. 2003; Corre-Hellou and Crozat 2005; Bedoussac and Justes 2009, **Chapter III, Part I**) and by the limited wheat early growth due to a lack of available mineral N in the soil in low N input systems. Thus, the IC wheat had a less serious N deficiency which allowed better photosynthesis and hence higher radiation use efficiency (e.g. Justes et al. 2000).

I.5 Conclusion

Our work has demonstrated that for low early N availability (no fertilizer or a small amount applied after the wheat booting stage) there was a marked complementarity between species for light and nitrogen use. This was due to species differences in their dynamics of growth in dry weight and height and to differences in species phenology and physiology that could be expressed when N availability is low during early growth. In particular, we observed that wheat growth was earlier than that of pea for both SC and IC and that the cereal was always taller than the legume. Consequently, when N fertilizer was applied early or in large amounts, we observed a big increase in the cereal growth in winter and early spring. Hence, when the legume's growth was expected to increase markedly, there was less light available to it, which reduced its dry weight production and consequently that of the whole IC. Conversely, with low N availability, intercropping allows better light interception over the whole growth period due to the slow growth of wheat in early stages and better pea growth in late stages. Moreover, no harmful competition for light was observed on the legume because wheat early growth was limited by a lack of available mineral N in the soil. Furthermore, thanks to the high N_2 fixation rate of pea in IC (Bedoussac and Justes 2009, **Chapter III, Part I**), wheat had access to a similar amount of available mineral N in the soil as in SC but produced less dry weight per square metre in IC due to light competition exerted by pea. However it then took advantage of the IC by taking up more N and increasing its nitrogen nutrition status throughout growth and hence by remobilizing more N into its grain in later stages.

The efficiency of IC compared with SC was determined by the complementary resource use between components of the intercrop as well as the relative strength of interactions acting within and between the two species. According to Cruz and Soussana (1997), it would be necessary to compare a sole crop sown at a density equal to that of the same species in the IC in order to distinguish intra and interspecific competitive interactions and to understand competition and facilitation mechanisms in IC. Nevertheless, our results indicate that IC productivity can be optimized by adapting cropping systems, N fertilization in particular, but also by choosing crop species of widely different phenology and/or morphology in order to maximize capture and minimize competition for solar radiation (Trenbath 1974). In particular it is essential to prevent an adverse effect on legume growth and also on N_2 fixation according to Bedoussac and Justes (2009) which is of great importance in shaping the final outcome of the IC.

We believe that it is now important to investigate the effect of wheat and pea cultivars on interspecies dynamics, hypothesizing that short or late wheat cultivars would be more suited for IC than tall or early ones and vice versa for pea cultivars. Later on, IC competition analysis – considering various legumes species, crop densities, sowing dates and N fertilisation – seems critical in order to optimize these innovative agroecosystems for specific objectives (grain or DW production, grain protein concentration increase, reduction of N leaching and chemical use etc.).

II. Analyse dynamique de l'élaboration du rendement de cultivars de blé dur en association avec du pois d'hiver.

Dynamic analysis of durum wheat cultivars yield formation to evaluate complementary behaviour in a wheat – pea intercrop

Article en cours de soumission à Journal of Applied Ecology.

Résumé

Nous avons mis en évidence précédemment que la fertilisation et le choix du cultivar de blé dur modifiaient les dynamiques et la production des espèces en association et donc la performance de ces systèmes. L'objectif de la présente étude a été de comparer la dynamique des compétitions inter- et intraspécifiques pour ensuite comprendre l'élaboration du rendement du blé dur en culture « pure » et en association. Les résultats d'une expérimentation réalisée en 2006-2007 dans le Sud-Ouest de la France sur du blé dur (*Triticum turgidum* L.) et du pois d'hiver (*Pisum sativum* L., cv. Lucy) cultivés seuls ou en association avec différents niveaux de fertilisation azotée et différents cultivars de blé dur ont servi de support à ce travail. Nos résultats ont permis de mettre en évidence le rôle des compétitions dans les stades précoces qui déterminent la mise en place des talles puis des épis de blé dur qui semble avoir été un point déterminant de la performance finale des associations. Nos résultats ont également montré que la productivité des associations pouvait être optimisée en choisissant des cultivars et des niveaux de fertilisation adaptés et ceci en fonction de l'objectif final recherché. Si ce dernier consiste à accroître la qualité du blé dur alors on privilégiera un apport d'azote tardif, des cultivars peu compétitifs (hauteur de paille réduite, peu tallant ou ayant des talles de faible biomasse) ou alors des cultivars ayant un niveau de protéines déjà élevé lorsqu'ils sont cultivés seuls. Si l'objectif est maintenant d'augmenter la proportion de la légumineuse dans l'association alors privilégiera également des cultivars peu compétitifs mais on n'apportera pas de fertilisation azotée. Inversement, une fertilisation précoce des association et l'utilisation de cultivars compétitifs (hauteur de paille élevée, produisant beaucoup de talles et/ou dont les talles ont une biomasse importante) augmentera la proportion de blé dur dans le mélange.

II.1 Introduction

Adapted from original manuscript

Species and cultivars to be intercropped must be chosen to optimize the use of light, both in space (intercropping crops that differ in their aerial architecture e.g. tall vs. short crops) and in time (mixing crops with life cycles that differ in timing e.g. early vs. late maturing crops) (Trenbath 1986; Tsubo et al. 2001; Tsubo and Walker 2004; Poggio 2005). Species interactions are complex, varying with, for example, nutrient availability, environmental factors and time (Connolly et al. 1990). Thus, intercropping studies cannot base their conclusions on data from just one single final harvest of crops grown at one level of N, for example (e.g. Dhima et al. 2007).

The aim of our study was to evaluate the effects of wheat cultivars and N availability modified by fertilization (quantity and splitting of doses) on durum wheat – winter pea intercrops compared to sole crops by analyzing crop growth and dynamic interactions within crops (intraspecific interactions) or between crops (interspecific interactions). In particular, our work proposes an innovative way to analyse the formation of wheat yield components and grain quality (protein content) in sole crops and intercrops, focusing on dynamic intraspecific and interspecific competition on yield components. The final outcome of our work will be to reveal durum wheat traits and N fertilization management suited to intercropping in order to optimize these innovative cropping systems for specific targets, such as maximum total yield or wheat grain protein concentration.

II.2 Materials and methods

Adapted from original manuscript

II.2.1. Site and Soil

The experiment was carried out on the experimental fields of the Institut National de la Recherche Agronomique station in Auzeville (SW France, 43°31’N, 1°30’E) in 2006-2007 see **Chapter II, Part IV** for details.

II.2.2. Experimental design

Four cultivars (cv.) of durum wheat (W) (*Triticum turgidum* L) named Acalou (Ac), Nefer (Nf), Neodur (Nd) and Orjaune (Oj) and one of winter pea (P) (*Pisum sativum* L., cv. Lucy) were grown as sole crops (SC), as half density sole crops (SC1/2) and as a mixed crop (IC for intercrop) in a row replacement design see **Chapter II, Part II** for details.

Fertilizer N sub-treatments, differing in quantity and splitting of doses (**Table 15**) were evaluated on intercrops, wheat sole crops and wheat half density sole crops while sole cropped pea and half density sole cropped pea were always grown without any N application see **Chapter II, Part II** for details. Mineral N available throughout crop growth varied from 94 to 171 kg N ha^{-1} (**Table 15**, for details see **Chapter III, Part I**) which would be regarded as low N input systems for durum wheat, a very N demanding crop (ca. 280 kg N ha^{-1} for a 8 t ha^{-1} grain).

The experimental layout was a randomized split-split-plot design with N application as main plots, cropping systems as subplots and wheat cultivars as sub-subplots, with 3 replicates for each combination of N fertilization, crops and wheat cultivars (4 replicates in N0 and 5 replicates for the sole cropped pea) see **Chapter II, Part II** for details.

The simplest layout to study mixed crops is the cultivation of components in alternate rows (Cruz and Soussana 1997) see **Chapter I, Part III** for details.

		N treatment			
		N0	N60+	N80	N140
Previous crop and amount of fertilizer-N (kg N ha^{-1})		*Helianthus annuus* 50	150	0	100
Initial mineral N (kg N ha^{-1})		30	52	28	46
Amount of fertilizer-N (kg N ha^{-1})	Zadoks 30 (Ear 1cm of wheat)	-	-	80	80
	Zadoks 37 (Flag Leaf Visible)	-	60	-	60
Estimated mineral N available (kg N ha^{-1})		94	144	150	171

Table 15 *Description of the different N treatments: i) previous crop and amount of fertilizer-N, ii) initial mineral N on 0-120 cm, iii) stages (Zadoks scale) and amount of fertilizer-N application and iv) estimated mineral N available.*

II.2.3. Measurements and analysis

Three samplings were carried out during the growing season at key development stages (using Zadoks scale for wheat (Zadoks 1974)): i) beginning of pea flowering (BPF, Zadoks 37 of wheat), ii) wheat flowering (WF, Zadoks 69) and iii) pea physiological maturity for sole cropped and half density sole cropped pea or wheat physiological maturity for the intercrops and wheat sole crops. At the '1cm ear stage' of wheat (E1cm, Zadoks 30) the number of green tillers was measured on 10 wheat plants from each replicate see **Chapter II, Part III** for details.

II.2.4. Calculations of indices used for analysing results

II.2.4.1. Comparative absolute growth rate

The comparative absolute growth rate (CGR) compares the dry weight growth rate (GR) within a given time interval (t_1 to t_2), of one species relative to another. CGR for a wheat – pea intercrop (IC) is the ratio between the growth rate of wheat (GR_W) and pea (GR_P) see **Chapter II, Part V** for details.

II.2.4.2. Interspecific interaction indices

The effect of pea on wheat dry weight (interspecific interactions) was evaluated by calculating the wheat interspecific interaction dry weight index (IE_{DW}) according to Jacquard (1968):

$$IE_{DW} = \frac{DW_{W-IC}}{DW_{W-SC1/2}}$$

where $DW_{W\text{-}IC}$ and $DW_{W\text{-}SC1/2}$ are the wheat intercrop and half density sole crop dry weights per unit area. IE_{DW} was calculated for each intercrop replicate using the replicate values of $DW_{W\text{-}IC}$ and the mean values across all replicates for $DW_{W\text{-}SC1/2}$ to eliminate the variation in the ratio attributed to $DW_{W\text{-}SC1/2}$ variability. When $IE_{DW} < 1$, the intercrop wheat row dry weight is reduced by interspecific competition. Conversely, when $IE_{DW} > 1$ the intercrop wheat row dry weight is significantly greater than that of a half density sole crop wheat row dry weight due to the presence of an intercrop pea row: this is known as "facilitation interference". By analogy, we calculated the interspecific interaction index by considering

yield formation components such as: plants m^{-2}, ears m^{-2}, grains m^{-2} and grain yield); we named them IE_{Plant}, IE_{Ear}, IE_{Grain} and IE_Y respectively.

These indices are related according to the following formulas:

$$IE_Y = IE_{Grain} \times \frac{1GW_{W-IC}}{1GW_{W-SC1/2}}$$

$$IE_{Grzin} = IE_{Ear} \times \frac{GperE_{W-IC}}{GperE_{W-SC1/2}}$$

$$IE_{Ear} = IE_{Plant} \times \frac{EperP_{W-IC}}{EperP_{W-SC1/2}}$$

where '1GW' is the single grain weight, 'GperE' the number of grains per ear and 'EperP' the number of ears per plant respectively for the intercropped wheat (W-IC) and the half density sole cropped wheat (W-SC1/2).

$$IE_Y = \frac{Y_{W-IC}}{Y_{W-SC1/2}}$$

II.2.4.3. Intraspecific interaction indices

The effect of the presence of wheat on wheat row dry weight, corresponding to the intraspecific interactions, was evaluated by calculating the wheat intraspecific interaction dry weight index (IA_{DW}) by analogy with IE_{DW} (see **Chapter II, Part V** for details):

$$IA_{DW} = \frac{DW_{W-SC}}{2 \times DW_{W-SC1/2}}$$

where $DW_{W\text{-}SC}$ is the wheat sole crop dry weight per unit area. IA_{DW} was calculated separately for each intercrop replicate using the replicate values of $DW_{W\text{-}SC}$ and the mean values across all replicates for $DW_{W\text{-}SC1/2}$. We multiply the half density sole crop dry weight by two in the calculation in order to compare sole crops and the half density sole crops on a plant or row basis as we did for the interspecific interaction index. When $IA_{DW} < 1$, the single spaced wheat row dry weight is reduced by intraspecific competition. On the other hand, when $IA_{DW} > 1$ the single spaced wheat row dry weight is increased by intraspecific interaction (facilitation).

We also calculated a wheat intraspecific interaction index for yield components (grains m^{-2}, ears m^{-2}, plants m^{-2} and grain yield) and we named them IA_{Grain}, IA_{Ear}, IA_{Plant} and IA_Y respectively. These indices are related according to the following formulas:

$$IA_Y = IA_{Grzin} \times \frac{1GW_{W-SC}}{1GW_{W-SC1/2}}$$

$$IA_{Grzin} = IA_{Ear} \times \frac{GperE_{W-SC}}{GperE_{W-SC1/2}}$$

$$IA_{Ear} = IA_{Plant} \times \frac{EperP_{W-SC}}{EperP_{W-SC1/2}}$$

$$IA_Y = \frac{Y_{W-SC}}{2 \times Y_{W-SC1/2}}$$

II.2.5. Statistics

Analysis of variance was carried out using the AOV procedure of the 2.7.1 version of R software (R development Core Team 2007) for each year and date of sampling separately, considering N treatments as the main factor, crops as a sub-factor and interaction between N treatments and crops. All data were tested for normal distribution using the Shapiro-Wilk test and pairwise comparisons were made using a two-tailed t-test to compare N treatments within crops and crops within N treatments at a significance threshold of p=0.10, chosen to take account of the variability of some measurements in our experiments, in particular for data sampled at various stages and analysed in dynamics. According to Sheskin (2004), the significance of differences between treatments can be estimated using simple comparisons when these have been planned beforehand, regardless of whether or not the omnibus F value is significant. Finally, confidence intervals for the means of CGR, IE and IA values were calculated from replicates assuming normal distribution according to Sheskin (2004). Scatter diagrams showing point classes (ellipses) were created with the "s.class – workpackage ade4" function of R software (Dray et al. 2007).

Wheat cultivar	N	Sowing to BPF	BPF to WF	WF to Harvest
Acalou	N0	1.3 ± 0.2 *	0.4 ± 0.4 +	0.3 ± 0.1 *
	N60+	5.1 ± 3.1	1.2 ± 0.5	1.0 ± 3.3
	N80	5.4 ± 3.8	-2.2 ± 5.3	-0.8 ± 1.1 +
	N140	4.4 ± 1.3 *	1.5 ± 0.9	-0.1 ± 0.5 *
	Mean	3.8 ± 3.0	0.2 ± 3.1	0.1 ± 1.9
Neodur	N0	1.4 ± 0.6	0.6 ± 0.3	-0.2 ± 0.7 +
	N60+	3.6 ± 1.9 +	1.6 ± 1.0	-1.2 ± 0.4 *
	N80	3.3 ± 1.0 *	1.3 ± 0.9	-1.3 ± 0.7 *
	N140	3.9 ± 1.0 *	4.4 ± 1.8	1.3 ± 2.2
	Mean	2.9 ± 1.6 *	2.0 ± 1.8	-0.4 ± 1.6
Nefer	N0	1.2 ± 0.4	0.4 ± 0.0 *	0.1 ± 0.2 *
	N60+	3.6 ± 0.6 *	2.3 ± 1.0	0.8 ± 0.3
	N80	3.3 ± 0.5 *	1.2 ± 0.4	0.1 ± 0.3 *
	N140	4.2 ± 2.8	0.9 ± 0.6	0.1 ± 0.1 *
	Mean	3.1 ± 1.9 *	1.2 ± 0.9	0.3 ± 0.4 *
Orjaune	N0	2.2 ± 0.8 +	0.9 ± 0.3	-8.5 ± 13.5
	N60+	4.5 ± 2.4 +	2.3 ± 0.7 +	-0.2 ± 0.2 *
	N80	3.1 ± 0.9 *	13.0 ± 13.6	-1.4 ± 1.5 +
	N140	4.6 ± 0.7 *	3.6 ± 1.6 +	0.4 ± 1.3
	Mean	3.6 ± 1.7 *	4.9 ± 8.3	-2.4 ± 7.7
Mean	N0	1.5 ± 0.7	0.6 ± 0.4 *	-2.1 ± 7.7
	N60+	4.2 ± 2.3 *	1.8 ± 0.9 *	0.1 ± 1.9 +
	N80	3.8 ± 2.2 *	3.3 ± 9.3	-0.8 ± 1.2 *
	N140	4.3 ± 1.7 *	2.6 ± 1.9 *	0.4 ± 1.4
	Mean	3.4 ± 2.2 *	2.1 ± 4.9	-0.6 ± 4.2

Table 16 *Comparative absolute growth rate (CGR) calculated in intercrops for the time interval: sowing to the beginning of pea flowering (BPF), BPF to wheat flowering (WF), WF to harvest (Harvest) the different N treatments and wheat cultivars. Values are the mean (n=3 to 4) ± standard error. Single plus (+) and single asterisk (*) indicate that CGR are significantly different from 1 at P=0.10 and P=0.05 respectively. Note that a* $CGR > 1 \Leftrightarrow DW_{W-IC}t_2 - DW_{W-IC}t_1 > DW_{P-IC}t_2 - DW_{P-IC}t_1$.

II.3 Results

II.3.1. Growth dynamics

II.3.1.1. Interspecies growth dynamics

Wheat emerged earlier than peas and was more efficient than the legume from sowing (S) to the beginning of pea flowering (BPF). Indeed, during that growth interval CGR values were above 1, indicating that wheat growth rate was higher than that of pea for all N treatments and wheat cultivars (**Table 16**). For all N treatments and cultivars CGR values between BPF and wheat flowering (WF) were lower than values calculated for sowing to BPF but remained always almost above 1 (except for N0 between BPF and WF). From WF to harvest maturity, CGR values were lower and sometimes negative due to wheat's apparent dry weight decrease, probably because of uncontrolled diseases, pests and lodging, leading to more senescent materials.

II.3.1.2. Intraspecific and interspecific interaction in dynamics

Representing IA_{DW} as a function of IE_{DW} for the different treatments and sampling periods (**Figure 35**) allows dynamic comparison of inter- and intraspecific interactions. All values are located close to or above the diagonal line corresponding to $IE_{DW} = IA_{DW}$ indicating that intraspecific competition was stronger than interspecific competition. IA_{DW} was always below 1, indicating that intraspecific competition reduced sole crop wheat row dry weight compared to wheat at half density (SC1/2). On the other hand, IE_{DW} was above 1 at the beginning of pea flowering for some treatments, suggesting possible "facilitation" in early growth stages. However, at wheat flowering and maturity, IE_{DW} was slightly below 1, indicating that interspecific competition finally reduced intercrop wheat dry weight compared to wheat at half density (SC1/2).

IA_{DW} and IE_{DW} values generally fell over time, in particular from the beginning of pea flowering to wheat flowering, indicating the increase of intraspecific and interspecific competition over the growth period. Moreover, the variability of values along the IE_{DW} axis was greater than along the IA_{DW} axis. This confirms that, whatever the N availability and wheat cultivar, intraspecific competition occurred more uniformly than interspecific competition. Moreover, the variability of IA_{DW} and IE_{DW} was markedly reduced over the growth period, at least until wheat flowering, which accords with the development of competition in early stages and during wheat stem elongation.

Wheat cultivar and the period of growth affected IE_{DW} more than N fertilization. On average for all N treatments, IE_{DW} values were not significantly different between wheat cultivars at the beginning of pea flowering. At wheat flowering, IE_{DW} values for mixtures with the Oj cultivar were significantly higher than for the other cultivars, indicating that Oj benefited more than them when intercropped between the beginning of pea flowering and wheat flowering. Finally at harvest two groups can be distinguished: i) Nf and Ac cultivars with low values of IE_{DW} (0.67) and ii) Nd and Oj cultivars with higher values (0.79). The effect of N fertilization throughout the growth period was not constant although IE_{DW} seems to be reduced in N0 compared to the N fertilized plots (0.71 and 0.87 respectively) in particular from wheat flowering to maturity.

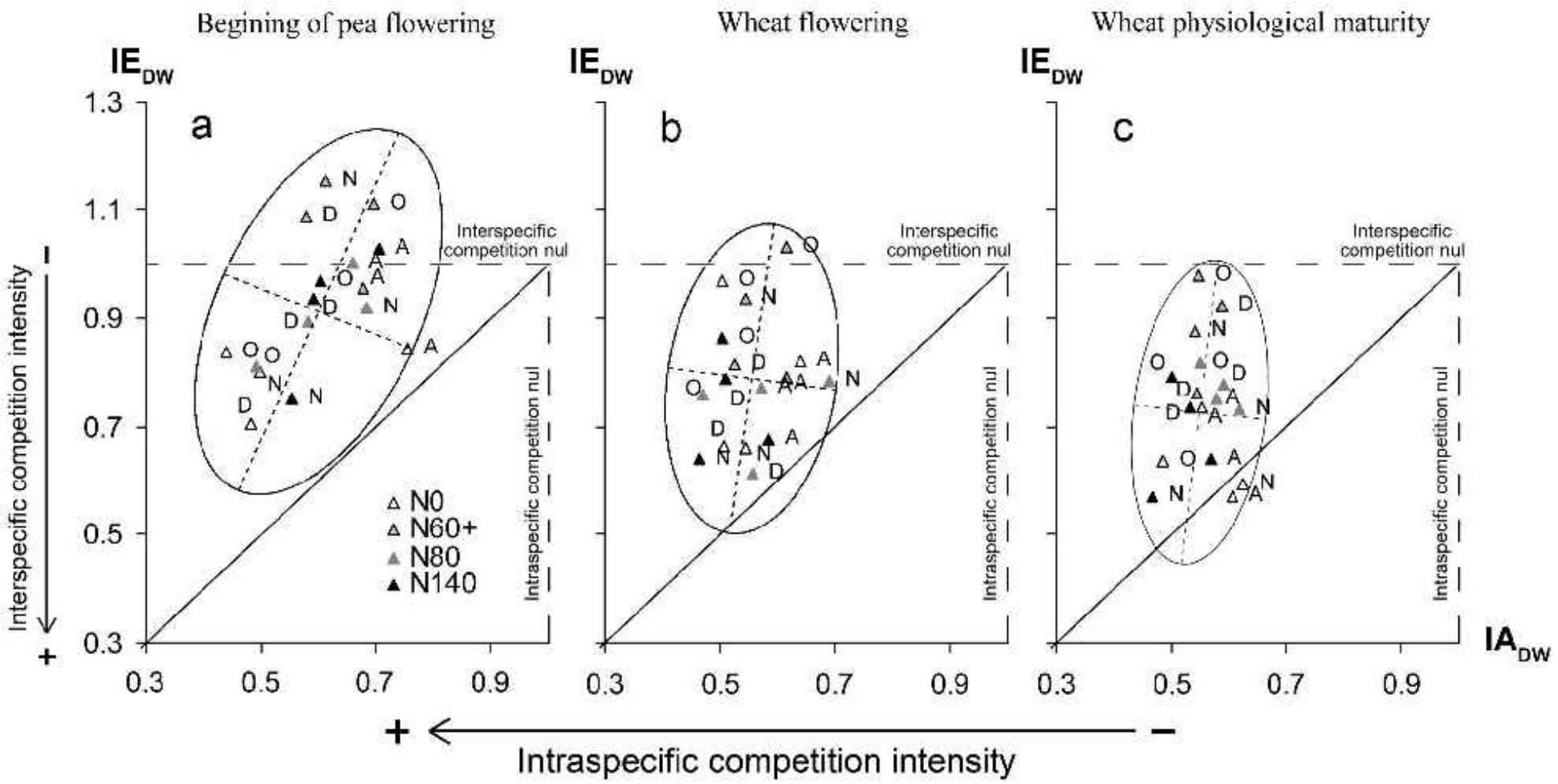


Figure 35 *Wheat dry weight interspecific interaction index (IE_{DW}) as a function of wheat dry weight intraspecific interaction index (IA_{DW}) for the different N treatments and wheat cultivars (Acalou: A, Nefer: N, Neodur: D and Orjaune: O) at: a) beginning of pea flowering, b) wheat flowering and c) wheat physiological maturity. Values are the mean (n=3 to 4).*

II.3.2. Wheat yield formation

II.3.2.1. Yield

Wheat yields (**Table 17**) were significantly lower in intercrops than in sole crops and half density sole crops; yield was lowest in N0 and highest in N60+ and N80. On average for all N treatments, no significant difference was found between wheat cultivar yield in sole crops and half density sole crops. However, the sole crop wheat yield was lower with Nd and Nf cultivars in N140 and with Nf in N60+. The intercropped pea yield was lower in mixtures with Nd and Oj cultivars while that of the intercropped wheat was always higher with Oj and lower with Nf. Thus, the whole intercrop grain yield was the lowest with Nd and Nf wheat cultivars as also observed for the wheat sole crops.

Cultivar	N	IC		SC	SC1/2
		Wheat	Pea		
Acalou	N0	1.3 ± 0.4	2.5 ± 0.3	2.7 ± 0.5	2.4 ± 0.4
	N60+	3.0 ± 0.8	1.3 ± 0.7	4.4 ± 0.8	4.0 ± 0.5
	N80	2.9 ± 0.6	1.1 ± 0.1	4.5 ± 0.4	3.9 ± 0.4
	N140	2.6 ± 0.6	1.1 ± 0.4	4.7 ± 0.9	4.0 ± 0.8
Neodur	N0	1.7 ± 0.4	1.8 ± 0.1	2.5 ± 0.4	2.4 ± 0.3
	N60+	3.3 ± 0.5	0.8 ± 0.5	4.4 ± 1.1	3.7 ± 0.6
	N80	2.8 ± 0.7	0.6 ± 0.3	4.4 ± 0.3	3.6 ± 0.4
	N140	2.4 ± 0.5	0.7 ± 0.1	3.6 ± 0.4	3.3 ± 0.6
Nefer	N0	1.4 ± 0.4	2.1 ± 0.3	2.8 ± 0.5	2.4 ± 0.3
	N60+	2.7 ± 0.6	1.2 ± 0.5	3.7 ± 0.2	3.7 ± 0.8
	N80	2.5 ± 0.2	1.2 ± 0.5	4.3 ± 0.3	3.3 ± 0.2
	N140	2.2 ± 0.4	0.8 ± 0.1	3.6 ± 0.9	3.7 ± 0.9
Orjaune	N0	2.0 ± 0.4	1.7 ± 0.2	3.0 ± 0.5	3.1 ± 0.3
	N60+	3.4 ± 0.2	0.9 ± 0.3	4.1 ± 0.6	3.7 ± 0.4
	N80	3.4 ± 0.5	0.7 ± 0.1	4.7 ± 0.2	4.0 ± 0.2
	N140	3.1 ± 0.6	0.7 ± 0.4	4.3 ± 0.1	3.9 ± 0.7
Pea	N0	—	—	3.3 ± 1.0	3.4 ± 0.8

Table 17 *Grain yield (t ha^{-1}) for the sole crops (SC), the half density sole crops (SC1/2) and the intercrops (IC) for the different N treatments and wheat cultivars. Values are the mean (n=3 to 5) ± standard error.*

II.3.2.2. Intraspecific and interspecific competition effects on wheat yield components

Figure 36 represents the interspecific interaction index (**Figure 36a and 36c**) and intraspecific interaction index (**Figure 36b and 36d**) calculated for the yield formation key variables (plants m^{-2}, ears m^{-2}, grains m^{-2} and yield), on average for all N treatments (**Figure 36a and 36b**) or for wheat cultivars (**Figure 36c and 36d**). Curve slopes between successive intraspecific interaction indices indicate that the ratio between wheat sole crop and wheat at half density (SC1/2) for EperP, GperE and 1GW successively was above 1 (positive slope) or below 1 (negative slope). The same interpretation applies for values of interspecific interaction index but for the ratio between intercropped wheat and half density sole cropped wheat.

Values of intra- or interspecific interaction indices were below 1 for wheat cultivars (**Figure 36a and 36b**) or N treatments (**Figure 36c and 36d**) except for IE_{Plant} and IA_{Plant} which were close to 1 as expected (same sowing density on a row). This indicates that intra- and interspecific competition greatly reduced wheat yield components compared to the half density sole cropped wheat, except the number of plants m^{-2}, indicating the same percentage of emergence of the durum wheat. Moreover, considering wheat cultivars or N treatments, IE indices were nearly always higher than their corresponding IA indices except when considering the number of plants m^{-2} and the number of ears m^{-2} in N0, where no difference was found between IE and IA values. Intraspecific competition was thus stronger than interspecific competition, indicating that a wheat row reduced the adjacent wheat row yield components more than a pea row. In general, intra- and interspecific competition mainly reduced the number of ears m^{-2} compared to wheat half density sole crops. Moreover, the curve slopes between IA_{Plant} and IA_{Ear} were lower than between IE_{Plant} and IE_{Plant} indicating that intraspecific competition primarily decreased the number of ears per plant (EperP) more than interspecific competition compared to wheat half density sole crops. On the other hand, whatever the wheat cultivar (**Figure 36a and 36b**) or the N treatment (**Figure 36c and 36d**), the number of grains per ear (GperE) was slightly reduced by interspecific competition as illustrated by the slight negative slopes between IE_{Ear} and IE_{Grain}; similar results were found for intraspecific competition. Finally, the grain weight (1GW) remained constant or was slightly increased in intercrops and sole crops compared to wheat half density sole crops.

Comparing wheat cultivars (**Figure 36a and 36b**), IA indices were similar between treatments, indicating that competition was similar whatever the wheat cultivar, whereas IE indices were significantly affected by wheat cultivar. In particular the value of IE_{Ear} for intercropping with the Oj cultivar was higher than for Nd which was higher than Ac, itself higher than Nf. These results indicate that interspecific competition reduced the number of ears m^{-2} compared to wheat half density sole crops whatever the wheat cultivar but Nf was more affected than Ac, which itself was more affected than Nd and Oj. Thus for IE_{Grain} and $IE_{Y,}$ two wheat groups could be distinguished: i) Nf and Ac cultivars with low index values and ii) Nd and Oj with higher index values indicating a lower competitive ability of Nf and Ac compared to Nd and Oj.

Interspecific and intraspecific competition also depended on N fertilization (**Figure 36c and 36d**). The interspecific curves for N60+ were higher than for N80 which was greater than for N140, which in turn was greater than for N0. Focusing on intraspecific competition, the curve for N140 was lower than for N60+ itself lower than for N80. For N0, IA_{Ear} was the highest, IA_{Grain} intermediate and IA_Y the lowest. Inter- and intraspecific competition mostly reduced the EperP while the GperE was only slightly affected and the 1GW was slightly increased except in N0.

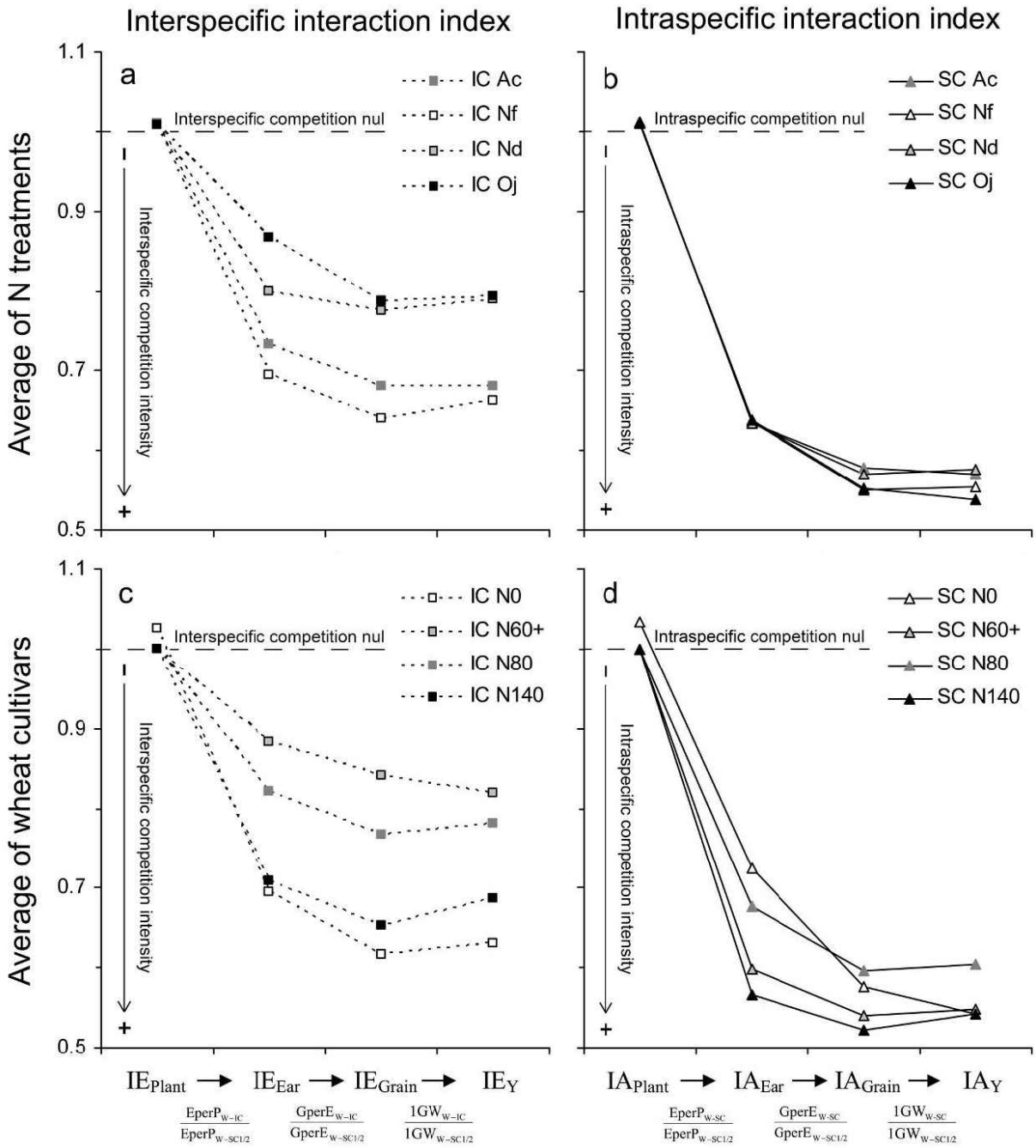


Figure 36 *Wheat interspecific interaction index (a and c) and wheat intraspecific interaction index (b and d) calculated from the number of plants m^{-2}, the number of ears m^{-2}, the number of grains m^{-2} or the yield for the different wheat cultivars (Acalou: Ac, Nefer: Nf, Neodur: Nd and Orjaune: Oj) considering: a and b) the average of all N treatments or c and d) the average of all wheat cultivars. Values are the mean (n=12 to 16).*

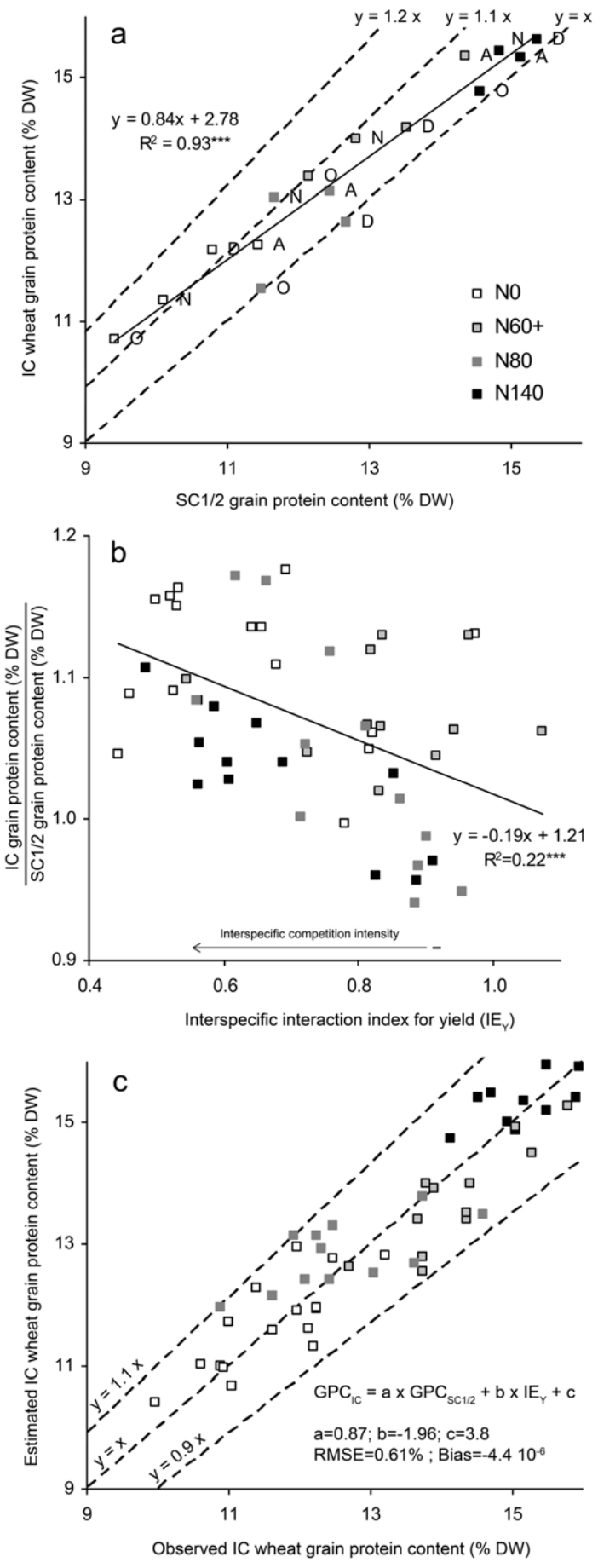


Figure 37 *For the different N treatments: a) Mean intercropped (IC) wheat grain protein content (GPC_{IC} in % of dry weight) as a function of mean half density sole cropped wheat grain protein content ($GPC_{SC1/2}$) for the different wheat cultivars (A: Acalou, N: Nefer, D: Neodur and O: Orjaune) values are the mean (n=3 to 4), b) ratio between intercropped and half density sole cropped wheat grain protein content as a function of the interspecific interaction index for yield (IE_Y) for all the replicates and finally c) estimated intercropped wheat grain protein content as a function of observed values considering the linear model:* $GPC_{IC} = a \times GPC_{SC1/2} + b \times IE_Y + c$ *including all N treatments. Double asterisk (**) and triple asterisk (***) indicate that that linear regression are significant at P=0.01 and P=0.001 respectively.*

II.3.2.3. Interspecific competition effects on wheat grain protein content

For all N treatments and cultivars, the intercropped wheat grain protein content (GPC) was significantly higher than that of the half density sole cropped wheat (**Figure 37a**) except for mixtures with Oj and Nd cultivars in N80. The linear regression indicates that the lower the half density sole cropped wheat grain protein content the greater was the increase in intercropped wheat grain protein content. Compared to the half density sole cropped wheat, the intercrop increased the grain protein content by 12%, 8%, 4% and 2% for N0, N60+, N80 and N140 respectively on average for all wheat cultivars and by 9%, 7%, 5%, 5% for Nf, Oj, Ac and Nd respectively on average for all N treatments.

Considering all the replicates, the higher the interspecific competition intensity, the greater was the increase in intercropped wheat grain protein content compared to the half density sole crop wheat grain protein content, as indicated by the linear correlation considering all N treatments (**Figure 37b**). Consequently the intercropped wheat grain protein content can be estimated from a linear model (**Figure 37c**) considering the half density sole cropped grain protein content and the interspecific interaction index. RMSE was low (0.61) without bias indicating a good fit of the model.

II.3.2.4. Wheat cultivar characteristics

In order to understand the differences between wheat cultivars and N treatments we propose to analyse the: i) plants m^{-2}, ii) tillers per plant, tillers m^{-2} and dry weight per tiller at '1cm ear', iii) ears m^{-2}, grains m^{-2} and thousand grain weight at maturity (**Table 18**) in intercrop, sole crop and wheat half density sole crop.

At the beginning of pea flowering and maturity wheat crop cover height was clearly lower in N0 than in the other three N treatments (61 and 93 cm respectively) for which it was the same. The Oj cultivar was significantly the tallest at the beginning of pea flowering and maturity (76 and 112 cm respectively) while Nf was the shortest at the beginning of pea flowering (62 cm) and Ac the shortest at maturity (87 cm).

At the beginning of wheat stem elongation ('E1cm' stage) the number of tillers per plant or per m^2 was highest for Nf and lowest for Ac, while no difference was found between Nd and Oj in intercrops, sole crops and half density sole crops. For N treatments, no difference was found in intercrops, sole crops and half density sole crops for the number of tillers m^{-2} but the number of tillers per square meter was higher in sole crops than in half density sole crops and intercrops. In sole crops the number of tillers per plant was lowest in N80 while for the half density sole crops it was lowest in N0 and N60+. The dry weight per tiller was not affected by the N treatments except in half density sole crops where the maximum was obtained in N60+. Focusing on wheat cultivars, the lowest value of tiller weight was measured for Nf in all cover treatment and the highest was found for Ac.

The number of ears m^{-2} was always lowest in intercrops and highest in sole crops for all N treatments and wheat cultivars. The number of ears per m^2 was increased with N-fertilization compared to N0 and no difference was found in intercrops between N-fertilized treatments. Moreover no significant difference was found between cultivars in half density sole crops while in intercrops the number of ears per m^2 was highest with Oj and lowest with Nf. Considering the grain weight (1GW), no significant difference was observed between cropping treatments (IC, SC or SC1/2). However, whatever the cropping treatment, 1GW was significantly reduced in N80 and more in N140.Considering cultivars, Oj and Nd had lower 1GW than Nf and Ac.

		Wheat cultivar (mean of N treatments)				N treatment (mean of wheat cultivars)			
		Acalou	Nefer	Neodur	Orjaune	N0	N60+	N80	N140
Number of plants m^{-2}	IC	85 ± 9 $^{d}_{2}$	101 ± 9 $^{b}_{2}$	93 ± 9 $^{c}_{2}$	113 ± 9 $^{a}_{2}$	102 ± 12 $^{a}_{2}$	96 ± 13 $^{ab}_{2}$	92 ± 16 $^{b}_{2}$	100 ± 13 $^{ab}_{2}$
	SC	170 ± 19 $^{d}_{1}$	203 ± 19 $^{b}_{1}$	186 ± 19 $^{c}_{1}$	227 ± 19 $^{a}_{1}$	207 ± 25 $^{a}_{1}$	192 ± 26 $^{ab}_{1}$	184 ± 33 $^{b}_{1}$	200 ± 26 $^{ab}_{1}$
	SC1/2	84 ± 9 $^{d}_{2}$	101 ± 9 $^{b}_{2}$	92 ± 9 $^{c}_{2}$	112 ± 9 $^{a}_{2}$	100 ± 13 $^{a}_{2}$	96 ± 13 $^{a}_{2}$	92 ± 16 $^{a}_{2}$	100 ± 13 $^{a}_{2}$
Number of tillers per plant	IC	4.1 ± 0.3 $^{b}_{1}$	6.0 ± 1.0 $^{a}_{1}$	4.4 ± 1.0 $^{b}_{12}$	4.0 ± 0.8 $^{b}_{1}$	4.3 ± 0.5 $^{a}_{1}$	5.0 ± 1.4 $^{a}_{1}$	4.2 ± 1.6 $^{a}_{12}$	5,0 ± 0.8 $^{a}_{12}$
	SC	3.2 ± 0.4 $^{c}_{2}$	4.8 ± 0.9 $^{a}_{2}$	3.7 ± 0.5 $^{bc}_{2}$	3.8 ± 0.3 $^{b}_{1}$	3.9 ± 0.8 $^{a}_{1}$	4.1 ± 0.8 $^{ab}_{1}$	3.3 ± 0.4 $^{b}_{2}$	4.1 ± 1.0 $^{ab}_{2}$
	SC1/2	4.1 ± 0.2 $^{b}_{1}$	5.7 ± 0.7 $^{a}_{12}$	5.0 ± 0.7 $^{a}_{1}$	5.0 ± 1.1 $^{ab}_{1}$	4.5 ± 0.5 $^{b}_{1}$	4.4 ± 0.5 $^{b}_{1}$	5.3 ± 1.0 $^{ab}_{1}$	5.6 ± 1.0 $^{a}_{1}$
Number of tillers m^{-2}	IC	366 ± 29 $^{b}_{2}$	641 ± 91 $^{a}_{2}$	434 ± 103 $^{b}_{2}$	479 ± 99 $^{b}_{2}$	465 ± 95 $^{a}_{2}$	517 ± 177 $^{a}_{2}$	425 ± 168 $^{a}_{2}$	513 ± 88 $^{a}_{2}$
	SC	582 ± 66 $^{c}_{1}$	1033 ± 207 $^{a}_{1}$	738 ± 122 $^{b}_{1}$	904 ± 73 $^{a}_{1}$	852 ± 215 $^{a}_{1}$	842 ± 204 $^{a}_{1}$	672 ± 156 $^{a}_{1}$	853 ± 273 $^{a}_{1}$
	SC1/2	372 ± 14 $^{c}_{2}$	610 ± 77 $^{a}_{2}$	491 ± 64 $^{b}_{2}$	590 ± 125 $^{ab}_{2}$	480 ± 92 $^{a}_{2}$	450 ± 63 $^{a}_{2}$	545 ± 159 $^{a}_{12}$	588 ± 142 $^{a}_{12}$
Dry weight per 1000 tillers (g)	IC	269 ± 61 $^{a}_{1}$	164 ± 22 $^{b}_{1}$	212 ± 16 $^{a}_{1}$	230 ± 38 $^{a}_{1}$	215 ± 41 $^{a}_{1}$	248 ± 73 $^{a}_{1}$	206 ± 62 $^{a}_{1}$	206 ± 31 $^{a}_{1}$
	SC	257 ± 12 $^{a}_{1}$	164 ± 47 $^{c}_{1}$	230 ± 23 $^{b}_{1}$	189 ± 35 $^{c}_{1}$	199 ± 57 $^{a}_{1}$	237 ± 39 $^{a}_{1}$	203 ± 39 $^{a}_{1}$	211 ± 43 $^{a}_{12}$
	SC1/2	239 ± 33 $^{a}_{1}$	164 ± 41 $^{b}_{1}$	209 ± 50 $^{ab}_{1}$	204 ± 55 $^{ab}_{1}$	210 ± 44 $^{ab}_{1}$	258 ± 25 $^{a}_{1}$	184 ± 47 $^{b}_{1}$	164 ± 24 $^{b}_{2}$
Number of ears m^{-2}	IC	165 ± 50 $^{ab}_{3}$	147 ± 39 $^{b}_{3}$	155 ± 48 $^{ab}_{3}$	184 ± 51 $^{a}_{2}$	107 ± 26 $^{b}_{3}$	186 ± 34 $^{a}_{2}$	178 ± 33 $^{a}_{3}$	198 ± 28 $^{a}_{3}$
	SC	285 ± 47 $^{a}_{1}$	269 ± 73 $^{ab}_{1}$	246 ± 54 $^{b}_{1}$	270 ± 48 $^{ab}_{1}$	224 ± 35 $^{c}_{1}$	252 ± 46 $^{b}_{1}$	293 ± 58 $^{a}_{1}$	316 ± 34 $^{a}_{1}$
	SC1/2	225 ± 59 $^{a}_{2}$	211 ± 60 $^{a}_{2}$	194 ± 58 $^{a}_{2}$	212 ± 46 $^{a}_{2}$	154 ± 30 $^{c}_{2}$	211 ± 49 $^{b}_{2}$	217 ± 20 $^{b}_{2}$	279 ± 21 $^{a}_{2}$
Number of grains m^{-2} (10^{-3})	IC	5.5 ± 2.1 $^{bc}_{2}$	5.0 ± 1.7 $^{c}_{2}$	6.4 ± 2.2 $^{ba}_{2}$	7.2 ± 2.0 $^{a}_{2}$	3.6 ± 1.1 $^{b}_{3}$	7.1 ± 2.0 $^{a}_{2}$	6.8 ± 1.2 $^{a}_{3}$	7.3 ± 1.3 $^{a}_{2}$
	SC	9.3 ± 2.5 $^{ab}_{1}$	8.5 ± 2.2 $^{b}_{1}$	9.4 ± 2.7 $^{ab}_{1}$	10.0 ± 2.0 $^{a}_{1}$	6.7 ± 1.2 $^{d}_{1}$	9.0 ± 1.8 $^{c}_{1}$	10.7 ± 1.1 $^{b}_{1}$	11.7 ± 1.2 $^{a}_{1}$
	SC1/2	8.1 ± 2.4 $^{a}_{1}$	7.9 ± 2.6 $^{a}_{1}$	8.3 ± 2.5 $^{a}_{1}$	9.1 ± 1.6 $^{a}_{1}$	5.8 ± 1.2 $^{c}_{2}$	8.4 ± 1.7 $^{b}_{12}$	8.9 ± 1.0 $^{b}_{2}$	11.1 ± 0.7 $^{a}_{1}$
One thousand grain weight (g)	IC	44 ± 5 $^{a}_{1}$	44 ± 6 $^{ab}_{1}$	40 ± 6 $^{b}_{1}$	41 ± 4 $^{b}_{1}$	45 ± 3 $^{a}_{1}$	45 ± 5 $^{ab}_{1}$	42 ± 2 $^{b}_{1}$	35 ± 5 $^{c}_{1}$
	SC	43 ± 4 $^{a}_{1}$	42 ± 7 $^{ab}_{1}$	40 ± 6 $^{ab}_{1}$	39 ± 4 $^{b}_{1}$	41 ± 3 $^{b}_{2}$	47 ± 4 $^{a}_{1}$	42 ± 2 $^{b}_{1}$	35 ± 6 $^{c}_{1}$
	SC1/2	44 ± 5 $^{a}_{1}$	42 ± 7 $^{ab}_{1}$	39 ± 6 $^{b}_{1}$	40 ± 4 $^{b}_{1}$	44 ± 2 $^{a}_{1}$	46 ± 3 $^{a}_{1}$	41 ± 3 $^{b}_{1}$	33 ± 5 $^{c}_{1}$

Table 18 *Number of plants m^{-2}, number of tillers per plant, number of tillers m^{-2}, dry weight per 1000 tillers (g), number of ears m^{-2}, number of grains m^{-2} and one thousand grain weight as a function of the wheat cultivar (mean of N treatments) or as function of the N treatment (mean of wheat cultivars) for the different cropping systems (intercrop: IC, sole crop: SC and half density sole crop: SC1/2). Values are the mean (n=12 to 16) ± standard error. For each variable, different superscript letters within the same cropping system indicate statistically significant differences at P=0.10 between wheat cultivars or N treatments and different suffix numbers within the same wheat cultivar or N treatment indicate statistically significant difference at P=0.10 between cropping system.*

II.4 Discussion

II.4.1. Growth dynamics

Sequential measurements of crop growth allowed a better understanding of dynamic competitive interactions and mechanisms than a single measurement of final yield (Connolly et al. 1990; Andersen et al. 2004). The CGR index revealed the earlier start of all the wheat cultivars, in particular until the beginning of pea flowering, as a result of faster seedling emergence and certainly faster root growth compared with peas (Hauggaard-Nielsen et al. 2001a). Then, until wheat flowering, wheat absolute growth rate was slightly faster than that of peas but then became slower until maturity. Our results are in accordance with a number of studies already made on cereal – legume intercropping (Corre-Hellou and Crozat 2005; Hauggaard-Nielsen et al. 2006) and with species differences in photoperiodism and their need of cold temperatures. Moreover, and as hypothesized, wheat growth rate was increased with N-fertilisation, unlike that of peas.

Intra- and interspecific interactions changed over time and both their indices suggest that competition increased over the growth period, in particular until wheat flowering, which is in keeping with the results obtained for CGR. More precisely we observed that the dispersion of values seems to fall throughout growth, which is in keeping with the development of competition from emergence to crop physiological maturity. Moreover throughout the growth period intraspecific competition were stronger than interspecific, confirming that peas were less competitive than wheat. Thus we observed the greatest variability in interspecific competition for the different N treatments and wheat cultivars. These results confirm that peas are most competitive at low N levels (Hauggaard-Nielsen and Jensen 2001; Ghaley et al. 2005). This is due to: i) the reduction in pea N_2 fixation, ii) the amplification of differences in species growth dynamics with N supply and iii) the intensification of competition for light between the two species, which affected wheat slightly but significantly reduced intercropped legume growth and yield. We also demonstrated the effect of wheat cultivar: pea competition with wheat was less with tall or early wheat cultivars.

II.4.2. Consequences on wheat yield components

We analysed the effects of inter- and intraspecific competition on wheat yield components throughout growth. Final grain yield can be expressed as the product of interdependent factors which take effect at particular or slightly overlapping stages (Gate 1995). In our conditions, the number of plants per unit area is determined between sowing and the end of winter and the number of green tillers from emergence to stage ‘1cm ear’. Then, until mid wheat stem elongation, some of the tillers regressed while others became ears, determining the number of ears per plant. The number of grains per ear is determined from the beginning of tillering to wheat flowering and finally, the weight per grain is determined between wheat flowering and physiological maturity.

Throughout growth the number of ears per plant was reduced more by intraspecific than by interspecific competition, no doubt due to the slow early pea growth (until wheat stem elongation) compared to that of wheat. Moreover, the number of ears per plant was also affected by wheat cultivars and N availability, confirming that within-species competition occurred during early stages. In particular, IE_{ear} depended strongly on the wheat cultivar, while IA_{Ear} was similar for all cultivars. Due to the similar height of wheat cultivars and slow early crop growth, light was certainly not limiting. Hence we can assume that until the ‘1cm ear’ stage of wheat, competition depended more on nutrients (in particular N) and water availability, depending on the number of tillers per plant or tiller dry weight. Conversely after

the beginning of wheat stem elongation there was an increase in competition for light which certainly depended on wheat height and obviously also on the number of tillers and their weight. Interspecific competition was highest in the unfertilized treatment because it had the highest pea dry weight while, in N140 it was due to the big reduction in the number of ears and consequently in the potential yield of wheat. In N80 interspecific competition also reduced the number of ears but this was less harmful because half density sole crop yield was limited by low available N in later stages. Finally, in N60+ interspecific competition was the lowest because the late N fertilizer application allowed an increase in the intercropped wheat yield because of the poor growth and hence competitiveness of peas in their late stages.

Comparing the number of tillers for a cropping treatment and a cultivar at a given sampling date is somewhat complicated. Indeed from the E1cm stage to wheat stem elongation some of the tillers regressed and it is therefore difficult to estimate the maximum number of tillers attained by a crop. However we can assume that the number of tillers counted at E1cm is a suitable indicator which could allow us to distinguish wheat cultivars patterns and in turn to understand their differences in competitiveness. Firstly, Nf produced a large number of small tillers per plant which are relatively uncompetitive and largely regressed due to the increase in interspecific competition. Secondly, Ac was definitely less competitive because of its short height, although this was partially compensated for by the large dry weight of its tillers. Lastly, Nd and Oj seem to be more sensitive to early interspecific competition due to i) a small number of tillers per plant and ii) intermediate values of dry weight per tiller. Thus Nd was more competitive than Ac because of its greater height and more competitive than Nf because of its greater dry weight per tiller. The Oj cultivar was the most competitive in late stages because it was the tallest. The number of grains per ear was also reduced by inter- and intraspecific competition but less so than the number of ears per plant. This suggests that, from tillering to wheat flowering, inter- and intraspecific competition were about the same but were clearly higher than competition occurring in a double spaced pure wheat crop. The single grain weight was not significantly affected by inter- or intraspecific competition for any N treatment or wheat cultivars. So we can conclude that inter- and intraspecific competition were similar to that occurring in a double spaced pure wheat crop.

II.4.3. Effects on grain protein content

We have shown that the increase in intercrop wheat grain protein content was negatively correlated with the wheat grain protein content in half density sole crops, but positively correlated with the intensity of interspecific competition. Thus the increase in wheat grain protein content for Nf and Oj in intercrop was greater than for Nd and Ac because of their lower half density sole crop wheat grain protein content. Moreover, the increase was higher for Nf than for Oj and higher for Ac than for Nd because of the lower competitiveness of Nf and Ac. However, Ac had only a small advantage compared to Nd because of the high grain protein content of these two cultivars. Considering N treatments, no increase was observed in N140 because of high grain protein content values, the converse being true in N0. Now, comparing N60+ and N80 we observed that the increase was slightly higher for N60+ than in N80 while the wheat GPC was higher in N60+ than in N80 and the interspecific competition for dry weight was higher in N80 than in N60+. As a first analyse these results seem to conflict with our hypothesis, especially as the N available for N80 and N60+ was similar and intercropped wheat yield was slightly different in both treatments. However, N80 was fertilized early (1cm ear stage), while it was later for the N60+ (flag leaf visible stage). This indicates that the difference between these two N treatments is the consequence of contrasting available N dynamics, i.e. the N uptake in the late stages from N fertilizer was incorporated more efficiently into grains than N remobilized.

II.5 Concluding remarks

These results illustrate the need to study more precisely the interactions and yield components in early stages and in particular the establishment of tillers and ears which seems to be key development stages to understand the lead-up to the final outcome of the intercrop. Nevertheless our results indicate that the productivity of intercrops can be optimized by using crop species and cultivars of widely different phenology and/or morphology in order to maximize resource capture and minimize competition for solar radiation absorption and also by adapting N fertilization (Trenbath 1974). Indeed, intercrop efficiency compared to sole crops is determined by the complementary resource use between components of the intercrop as well as the relative strength of the intra- and interspecific competitive interactions acting within and between crops. Bedoussac and Justes (2009) believe that it is important to allow sufficient pea growth to reduce wheat yield and thus improve its grain protein content and obviously to produce a good grain legume yield. Both N fertilization practices and wheat cultivar must be carefully chosen in order to minimize early competition for light and nutrients, particularly before the end of pea flowering, which could significantly reduce pea growth. However, optimization of these innovative cropping systems depends on the aim. At present it seems that, if the objective is to obtain the highest wheat grain protein concentration, one should choose wheat cultivars that already have high grain protein content when sole cropped (e.g. Nd or Ac) or relatively uncompetitive cultivars (e.g. Nf) and apply a moderate amount of fertilizer N late in growth. When the goal is to increase the legume production, less competitive wheat cultivars (e.g. Nf and Ac) must be chosen and without N fertilization. Conversely to increase the production of wheat in the mixture it is recommended to sow highly competitive wheat cultivars such as Nd or Oj or less competitive cultivars that produce higher yield when sole cropped (e.g. Ac) and obviously to fertilize the intercrops. Finally to increase the whole IC grain production, the choices of cultivars and N management will depend on the target proportion of each species and on the system considered (low N input sole crops, high productive sole crops…).

Our paper focuses on N fertilization and wheat cultivars but it could be interesting to also consider other legume species and a wider range of cultivars in order to optimize these innovative agroecosystems.

CHAPITRE V

CONCEPTION PAR EXPERTISE ET EVALUATION DE PROTOTYPES D'ITINERAIRES TECHNIQUES D'ASSOCIATIONS BLE DUR – LEGUMINEUSE A GRAINES

Ce chapitre n'est pas actuellement sous une forme d'article original pouvant être soumis à une revue internationale. Toutefois, nous pensons pouvoir le valoriser sous forme de deux publications à soumettre à European Journal of Agronomy ou à Agronomy for Sustainable Development.

I. Critères et objectifs de production : du concept aux associations

I.1 Critères et objectifs de production : cadre conceptuel

Adapté de Michel Sebillotte et Louis-Georges Soler (C.R. Acad. Agric. Fr. 74(4)59:70, 1988).

Un itinéraire technique est la combinaison logique et ordonnée des techniques mises en œuvre sur une parcelle agricole en vue d'en obtenir une production (Sebillotte 1974) en considérant l'existence d'interactions fortes entre les techniques (choix des espèces, variétés, dates de semis, densité de semis, fertilisation, protection phytosanitaire…). Par conséquent l'itinéraire technique constitue un ensemble cohérent où le choix d'une technique ne peut être raisonné indépendamment de celui de l'ensemble des autres techniques. De plus, l'évaluation et la conception d'un itinéraire technique ne peuvent se faire qu'en référence à un ou des objectifs de production qui sont : i) dépendant de l'acteur (agriculteur, technicien, chercheur…), ii) fonction des contraintes (positives ou négatives) auquel il est soumis et qui peuvent être aussi bien techniques, qu'économiques ou sociales et iii) des objets dynamiques et multicritères :

- **Dynamiques**, car le(s) objectif(s) de production et les moyens techniques mis en œuvre pour le(s) réaliser ne sont pas donnés une fois pour toutes mais peuvent être réévalués. En effet, les processus de décision s'inscrivent dans la durée et l'acte de décider doit donc être vu comme un déroulement d'actions sur la base d'analyses d'états intermédiaires. Cette révision de l'objectif et des moyens mis en oeuvre est fondée sur les perceptions que l'acteur a de sa situation et de l'ensemble des contraintes qui limitent ses possibilités d'action et qui peuvent donc évoluer dès lors que celui-ci réalise un diagnostic amenant à une prise de décision. A titre d'exemple, une mauvaise levée du blé dur entraînera une révision de l'objectif de rendement à la baisse et donc une diminution de la fertilisation azotée à apporter. Cependant, si l'hiver est clément et le tallage important, alors cet objectif sera réévalué à la hausse et un apport de fertilisation pourra être envisagé et ainsi de suite.

- **Multicritères**, car le décideur n'est ni pleinement rationnel ni à la poursuite d'une finalité unique dans les choix et la mise en œuvre des moyens de production. L'acteur agit ainsi selon une rationalité limitée (Simon 1982) à savoir qu'il n'a pas : i) une vision claire de toutes les alternatives qui s'offrent à lui, ii) une connaissance parfaite des conséquences de tous les choix possibles et enfin iii) la capacité de ranger ces conséquences selon une échelle de préférence fixe. A cela s'ajoute la prise en compte de l'incertitude, à savoir que toute décision suppose de se projeter dans le futur, ce qui va dépendre fortement de la façon dont le décideur appréhende la probabilité de réalisation de celui-ci (e.g. Favereau 1982 ; Munier 1984). Enfin, les objectifs du décideur peuvent être vus comme une fonction d'utilité plus ou moins complexe en avenir incertain intégrant un nombre variable d'objectifs premiers et pour laquelle il n'y a pas nécessairement de solution.

I.2 Quels objectifs de production pour les associations ?

Comme nous venons de l'illustrer, la conception d'itinéraires techniques cohérents et acceptables ainsi que leur évaluation nécessitent de définir des objectifs de production

a priori, ce qui ne peut être fait de façon exhaustive puisque ces objectifs sont, comme nous l'avons vu, dynamiques, multicritères et dépendants de l'acteur et des contraintes auquel il est soumis. Notre objectif est de ce fait plus modeste. Il s'agit pour nous de définir quelques objectifs de production d'associations afin de mettre en œuvre une démarche de conception de prototypes d'itinéraires techniques. Pour cela, nous avons d'abord cherché à identifier les leviers dont on dispose dans le choix des différentes techniques culturales pour modifier le fonctionnement et la performance des associations.

Nous avons privilégié, comme principal objectif pour la conception d'itinéraires techniques des associations, celui d'obtenir un blé dur de qualité technologique satisfaisante, tout en produisant une quantité correcte de grains. Rappelons que la production de blé dur de qualité est un enjeu majeur dans les systèmes bas-intrants et agriculture biologique où l'azote est souvent une ressource limitante et pour lesquels il est donc souvent difficile d'atteindre une teneur en protéines suffisante pour éviter le mitadinage qui est un accident physiologique affectant la vitrosité du grain. Un grain de blé dur non vitreux le rend inapte à la production de semoule et de pâtes ce qui engendre pour l'agriculteur une perte économique importante du fait du déclassement du grain vers l'alimentation animale. Pour ces raisons la production de blé dur est extrêmement faible en France en situation d'agriculture biologique alors que la demande est forte. Un des enjeux de ce travail est donc de contribuer indirectement à la mise en place d'une filière française de blé dur en agriculture biologique.

On peut aussi cultiver des associations pour maximiser la production de protéagineux et augmenter la production de protéines végétales ou encore pour obtenir un mélange équilibré de céréale et de légumineuse à graines. Ce dernier objectif semble plus particulièrement adapté dans le cas de mélanges destinés à l'alimentation animale avec comme céréale le triticale, le blé tendre ou d'autre céréales secondaires, mais ce n'est pas l'objectif recherché dans le cas des associations blé dur – légumineuse à graines où la production de blé dur est destinée à l'alimentation humaine (fabrication de pâtes, semoule…). Rappelons que l'augmentation de la production de légumineuses à graines en Europe est un enjeu majeur quand l'on sait que 70% des besoins en protéines végétales sont satisfaits par l'importation (chiffres 2005-2006, PROLEA 2007), essentiellement sous forme de soja provenant des Etats-Unis et d'Amérique Latine. Cet enjeu est tout aussi crucial pour l'Agriculture Biologique.

Au-delà de ces objectifs quantitatifs ou qualitatifs, on pourrait vouloir cultiver des associations dans le but de réduire les impacts négatifs sur l'environnement et notamment l'utilisation de produits phytosanitaires, ce qui suppose une diminution des dommages des maladies, ravageurs et mauvaises herbes sur la culture. Notons que cet objectif rejoint ceux précédemment énoncés puisque, de fait, une moindre pression des facteurs biotiques augmente la production à la fois quantitativement et qualitativement. De plus, cela pourrait être un moyen d'améliorer la performance économique des systèmes de production, en particulier dans un contexte structurel d'augmentation du prix des intrants. D'ailleurs, sur le plan économique la maximisation de la marge brute ou de la marge directe peut être un objectif en soi dont la réalisation peut être obtenue aussi bien par une augmentation de la production (du produit) que par une diminution des charges et bien évidement par la conjonction optimisée de ces deux éléments.

Notons par ailleurs que, dans un objectif de durabilité, on pourra vouloir minimiser la variabilité interannuelle de la production ou des résultats économiques et ceci en intégrant le temps de travail, qui pour certains actifs, est un enjeu majeur. Nous pouvons citer un dernier cas de figure, à savoir que, par exemple, pour un gestionnaire de bassin versant il pourrait être intéressant de voir cultiver des associations afin de réduire le reliquat azoté et donc le potentiel de lessivage par rapport à une légumineuse cultivée seule ou par rapport à un blé dur

hautement fertilisé. Cela présenterait également un intérêt pour le cultivateur dans un objectif d'économie d'engrais azoté par une meilleure valorisation de cette ressource.

Notons que les objectifs décrits précédemment pourraient, de manière générale et à quelques exceptions près, être formulés aussi bien par des agriculteurs que des chercheurs ou des décideurs. Dans le cadre de notre recherche, nous avons également voulu répondre à des questions plus spécifiques comme par exemple et nous le verrons par la suite : est-ce que la structure du couvert modifie le partage du rayonnement et la proportion des deux espèces à la récolte ? Notons que, si *a priori* ce type de question concerne plutôt le chercheur, elle présente également un intérêt indirect pour l'agriculteur. En effet, dans cet exemple précis, la réponse à notre question va déterminer les choix de densités ou les modes de semis et donc la technicité, le coût ou le temps de travail à adopter.

Dans la suite de cette partie nous présenterons les différents itinéraires techniques conçus à dire « d'experts », c'est-à-dire en utilisant les connaissances acquises durant cette thèse et le partage d'informations avec différents collègues, conseillers agricoles et membres de coopératives agricoles. Nous présenterons successivement les objectifs visés des itinéraires techniques conçus ainsi que les hypothèses sous-jacentes. Les objectifs que nous avons définis initialement sont basés aussi bien sur des considérations agricoles que scientifiques.

II. Présentation, objectifs et hypothèses des prototypes d'itinéraires techniques conçus à dire « d'experts »

II.1 Association en ligne blé dur – pois d'hiver

Ces itinéraires techniques, où chaque espèce est semée à une densité égale à la moitié de celle de cultures « pures » et en rangs alternés, sont pour nous les références « expérimentales » (système substitutif) pour produire du blé dur de qualité avec une production de céréale d'au moins la moitié de la quantité de grains. Cette association en ligne a été testée avec deux variétés de blé dur : Neodur (ICPlin-Nd-N35P1) qui est un blé dur de bonne qualité technologique relativement compétitif et Acalou (ICPlin-Ac-N35P1) dont la teneur en protéines est plus faible mais de moindre compétitivité et ayant une production quantitative satisfaisante. Nous avons choisi de garder la variété de pois d'hiver Lucy pour les deux variantes. Notons que dans le cas de l'association Acalou – Lucy le semis a été décalé d'un mois et demi en raison de la précocité de cette variété de blé dur qui la rend potentiellement sensible à des gels tardifs en sortie d'hiver en début de montaison. Par ailleurs, ces itinéraires techniques nous ont servi de comparatifs interannuels puisqu'ils ont été testés en expérimentation en 2005-2006 et 2006-2007 sous des formes relativement proches. Pour ces associations, nous avons opté pour une fertilisation tardive uniquement (35 kg N ha^{-1} au stade gonflement du blé dur) dont l'objectif est, comme nous l'avons démontré précédemment, d'accroître la production et la qualité du blé dur sans pour autant trop affecter la fixation symbiotique et la production de la légumineuse. Enfin, nous avons décidé de nous placer dans une logique « bas intrants » avec seulement un traitement de semence fongicide et un désherbage chimique en prélevée mais pas de protection insecticide ni fongicide en végétation. Le blé dur et le pois d'hiver en association pourraient être moins sensibles aux maladies et ravageurs que les cultures « pures » correspondantes, ce que nous avons voulu vérifier expérimentalement.

II.2 Association en « vrac » blé dur – pois d'hiver

Ces deux itinéraires techniques diffèrent des deux précédents par la structure du couvert. En effet, dans le cas présent les deux espèces ont été semées à l'aide d'un semoir agricole, par conséquent les espèces sont mélangées sur le rang et non sur des rangs séparés comme pour les associations en ligne (ICPlin). Ces itinéraires techniques sont *a priori* davantage compatibles avec la pratique qu'un agriculteur serait à même de réaliser et représentent donc pour nous le témoin « agricole ». L'objectif est d'obtenir du blé dur de qualité suffisante tout en réduisant le temps de travail. D'un point de vue plus scientifique, il s'agit principalement de tester l'effet du semis en « vrac » sur la performance de l'association comparativement au semis en ligne et en particulier d'un point de vue du partage du rayonnement et des compétitions interspécifiques. On s'attend, en particulier, à ce que la compétition du blé dur sur le pois d'hiver soit accrue en mélange en « vrac » comparativement à l'association en ligne. En effet, dans un semis en ligne chaque espèce occupe un rang et peut donc se développer dans un premier temps sur le rang et l'inter-rang sans être en concurrence immédiate avec l'autre espèce, ce qui n'est pas le cas des mélanges plus intimes où les compétitions interspécifiques vont se produire dès la levée. Notons que des choix identiques aux itinéraires techniques en ligne ont été faits d'un point de vue de la protection phytosanitaire, de la fertilisation azotée et de la densité de semis.

II.3 Association en ligne additive blé dur – pois d'hiver

L'objectif de cet itinéraire technique est d'obtenir un blé dur ayant une très forte teneur en protéines sans apport de fertilisation azotée et en limitant l'utilisation de produits phytosanitaires ; l'hypothèse scientifique sous-jacente étant que l'augmentation de la densité de pois d'hiver comparativement au semis en ligne (la densité du pois d'hiver dans cette association est identique à celle recommandée en culture « pure ») devrait engendrer un accroissement des compétitions interspécifiques du pois d'hiver sur le blé dur (la céréale étant semée à une densité égale à 50% de celle en culture seule) et donc une diminution importante du tallage du blé dur. Par conséquent, le blé dur produisant moins d'épis et donc moins de grains devrait voir sa teneur en protéines nettement augmenter grâce à une meilleure remobilisation de l'azote ce qui ne nécessite pas *a priori* d'apport de fertilisation azotée. Dans cette situation, nous avons donc opté pour un blé dur ayant une compétitivité forte de façon à ce que le pois d'hiver « n'étouffe » pas complètement la céréale. Nous avons également opté pour un blé dur ayant une bonne qualité technologique, ce qui nous a amené à choisir le cultivar Neodur. Pour les mêmes raisons que précédemment, nous avons décidé de nous placer dans une logique de bas intrants avec seulement un traitement de semence fongicide et un désherbage chimique en prélevée mais pas de protection insecticide ni fongicide.

II.4 Association en ligne blé dur – féverole d'hiver sans intrant

Cet itinéraire technique a pour objectif de produire du blé dur de qualité suffisante sans utilisation d'intrants de synthèse (N0AB*) simulant une situation d'agriculture biologique. Toutefois, il ne s'agit pas réellement d'agriculture biologique car bien que la conduite respecte le minimum requis par le cahier des charges (pas d'utilisation de molécules de synthèse) elle a été menée sur une parcelle ayant été cultivée de manière conventionnelle jusque là. Il n'y a donc pas eu respect du délai requis de trois ans pour la conversion des terres en agriculture biologique et c'est pourquoi nous utiliserons la notation AB* dans la suite de cet exposé. La production du pois d'hiver en agriculture biologique (sans

intrant), et en particulier dans le cas de semis d'hiver, pose de nombreux problèmes et notamment d'un point de vue des maladies, ravageurs et de la verse. La féverole d'hiver – potentiellement moins sensible aux bio-agresseurs et à la verse – semble donc une alternative à privilégier en agriculture biologique, ce qui explique notre choix pour cette légumineuse. Par ailleurs, l'objectif de cet itinéraire technique était de vérifier l'hypothèse selon laquelle l'association blé dur – féverole d'hiver permettrait de réduire les populations de ravageurs (pucerons et sitones) mais également les maladies du blé dur et de la féverole d'hiver. D'un point de vue pratique, les espèces ont été semées en deux passages, tout d'abord la céréale sur 6 rangs (inter-rang = 29 cm) puis en intercalant la légumineuse mais uniquement un rang sur deux (inter-rang = 58 cm) et ceci afin d'accroître les compétitions intraspécifiques de la féverole d'hiver et de diminuer les compétitions interspécifiques de la féverole d'hiver sur le blé dur. Notons qu'étant donné le potentiel de dominance de la féverole d'hiver il est important de choisir un blé dur ayant une hauteur de paille élevée et de bonne qualité technologique, ce qui nous a amené à nous orienter vers la lignée L1823 (issue d'un programme de sélection participative entre l'INRA Mauguio, une association d'agriculteurs en AB et la Coopérative AgriBio Union). Ce choix est d'ailleurs cohérent avec les enjeux de la sélection de cette variété sur des critères d'agriculture biologique. En outre, ce système ne nécessite *a priori* pas d'apport de fertilisation azotée puisque la féverole d'hiver devrait réduire de manière significative le tallage du blé dur et donc accroître sa teneur en protéines. Notons qu'en raison de l'absence de désherbage chimique en prélevée il a été prévu *a priori* d'effectuer des désherbage mécaniques à la herse étrille. Enfin, du fait de l'absence de traitement de semence et des risques de fonte de semis plus importants nous avons augmenté les densités de semis de 25% comparativement aux situations avec traitement de semence et ce aussi bien pour le blé dur que pour la féverole d'hiver.

II.5 Association en ligne blé dur – féverole d'hiver très bas intrants

Cet itinéraire technique diffère du précédent uniquement par l'application d'un traitement de semence fongicide et par la densité de semis qui est égale pour les deux espèces à 50% de celle des cultures seules et 25% inférieure à celle de l'association ICFlin-L1823N0AB*. En effet, comme nous l'avons vu plus haut, la gestion des densités est un élément essentiel de la performance des associations blé dur – féverole d'hiver. Or, les pertes à la levée (fontes de semis) peuvent conduire à des peuplements très en deçà des objectifs souhaités, ce qui pourrait être résolu en partie par l'utilisation de semences traitées et certifiées. Par ailleurs, comme dans le cas de l'association blé dur – féverole d'hiver sans intrant (N0AB*) nous avons choisi un cultivar de blé dur à paille haute et produisant des talles ayant une biomasse importante et qui serait donc *a priori* plus compétitif et mieux adapté pour les associations avec la féverole d'hiver. Enfin, il s'agit de tester une légumineuse autre que le pois d'hiver dans des systèmes à très bas-intrants et à la différence des mélanges blé dur – pois d'hiver un apport d'azote même tardif n'est *a priori* pas nécessaire. En effet, la féverole d'hiver est plus compétitive que le pois d'hiver ce qui devrait réduire de façon importante le tallage de la céréale et donc engendrer un gain important de la teneur en protéines de la céréale.

Rq : Le codage utilisé pour les itinéraires techniques d'association correspond : 1) à la légumineuse associée : « ICP » pour les associations blé dur – pois d'hiver et « ICF » pour les associations blé dur – féverole d'hiver, 2) à la structure de l'association : « lin » pour les associations semées en rangs alternés, « mix » pour les associations semées en mélange sur le rang et « add » pour l'association additive semée en rangs alternés, 3) au cultivar de blé dur : « Nd » pour Neodur, « Ac » pour Acalou et L1823, 4) à la fertilisation azotée : « N0 » en absence de fertilisation azotée et « N35 » lorsque

35 kg N ha^{-1} ont été apportés au stade gonflement du blé dur et 5) à la protection phytosanitaire : « AB » en absence de protection phytosanitaire et « P1 » lorsqu'un traitement de semence et un desherbage chimique en prélevée ont été réalisés.*

II.6 Présentation des itinéraires techniques monospécifiques servant de référence pour l'évaluation des associations

L'objectif de l'essai était d'évaluer la performance des prototypes d'associations et notamment vis-à-vis des maladies et ravageurs en les comparant à des cultures « pures » de références pour quelques cas types de systèmes de production.

II.6.1. Cultures « pures » de blé dur

Les trois cultivars de blé dur testés en association ont été évalués en culture « pure » sous trois itinéraires techniques différents semés à la densité recommandée le même jour que les associations à savoir : le 07/11/2007 pour Neodur et L1823 et le 19/12/2007 pour Acalou :

- En absence d'intrant de synthèse (N0AB*) et ce uniquement pour la lignée L1823 avec deux désherbages à la herse étrille les 29/01/2008 et 11/02/2008. Cet itinéraire technique servira de référence aux associations en ligne avec la féverole d'hiver ICFlin-L1823N0AB* et ICFlin-L1823N0P1. Notons qu'en raison de l'absence de traitement de semence la densité de cette culture a été augmentée de 25% comparativement aux autres blés durs monospécifiques.

- En système bas intrants (N35P1) avec 35 kg N ha^{-1} (35 kg N ha^{-1} au stade gonflement du blé dur pour accroître la teneur en protéines), aucune protection phytosanitaire hormis un désherbage chimique en prélevée (Trifluraline à 900 g ha^{-1} et Linuron à 450 g ha^{-1}) et un traitement de semence pour les cultivars Acalou et Neodur. Ces traitements serviront de référence aux associations en ligne (ICPlin-NdN35P1 et ICPlin-AcN35P1), aux associations en mélange sur le rang (ICPmix-NdN35P1 et ICPmix-AcN35P1) ainsi qu'à l'association additive (ICPadd-NdN0P1).

- En système raisonné (N75P2) qui consiste en un apport de 75 kg N ha^{-1} (40 kg N ha^{-1} au stade épi 1cm du blé dur et 35 kg N ha^{-1} au stade gonflement du blé dur), un désherbage chimique en prélevée, un traitement de semence et deux applications de fongicide (Fenpropimorphe (375 g ha^{-1}) + Epoxiconazole (126 g ha^{-1}) le 09/04/2008 et Metconazole (90 g ha^{-1}) le 13/05/2008). Cet itinéraire technique a été testé sur les 3 cultivars de blé dur (L1823, Acalou et Neodur). Ils serviront à évaluer l'effet des associations et des traitements phytosanitaires en végétation sur les maladies ainsi que pour l'analyse technico-économique des associations.

II.6.2. Cultures « pures » de pois d'hiver et de féverole d'hiver

Trois itinéraires techniques de légumineuses monospécifiques – sans fertilisation azotée, semés le 7 novembre 2007 en 6 rangs espacés de 29 cm – ont été comparés : i) pois d'hiver et féverole d'hiver « purs » sans intrant (N0AB*) désherbés en deux passages de herse étrille et dont la densité de semis a été augmenté de 25% en raison de l'absence de traitement de semence, ii) pois d'hiver et féverole d'hiver « purs » très bas intrant (N0P1) semés à une densité normale avec un désherbage en prélevée et un traitement de semence et iii) pois d'hiver et féverole d'hiver « purs » raisonnés qui correspondent à l'itinéraire technique N0P1 avec en plus un traitement insecticide le 19/03/2008 (Lambda-cyhalothrine 6.25 g ha^{-1}) et un

traitement fongicide le 13/05/2008 (Metconazole 90 g ha^{-1}). Le pois d'hiver seul N0P1 servira de référence aux associations avec le pois d'hiver (ICPlin-NdN35P1, ICPmix-NdN35P1, ICPadd-NdN0P1, ICPlin-AcN35P1 et ICPmix-AcN35P1). Les féveroles d'hiver N0P1 et N0AB* serviront quand à elles de référence aux associations en ligne ICFlin-L1823N0P1 et ICFlin-L1823N0AB* respectivement.

Rq : Le codage utilisé pour les itinéraires techniques monospécifiques correspond : 1) au cultivar de blé dur : « Nd » pour Neodur, « Ac » pour Acalou et L1823 ou à la légumineuse : « P » pour le pois d'hiver et « F » pour la féverole d'hiver, 2) à la fertilisation azotée : « N0 » en absence de fertilisation azotée, « N35 » lorsque 35 kg N ha^{-1} ont été apportés au stade gonflement du blé dur et « N75 » pour 75 kg N ha^{-1} apportés en deux apports de 40 kg N ha^{-1} au stade épi 1 cm du blé dur et 35 kg N ha^{-1} au stade gonflement du blé dur, 3) à la protection phytosanitaire : « AB » en absence de protection phytosanitaire, « P1 » lorsqu'un traitement de semence et un desherbage chimique en prélevée ont été réalisés, « P2 » correspondant à P1 plus deux traitements fongicides en végétation et « P3 » correspondant à P1 plus un traitement insecticide et un traitement fongicide en végétation.*

II.7 Récapitulatif des traitements expérimentaux

Le **Tableau 19** ci-dessous récapitule les différents itinéraires techniques d'associations et de cultures « pures » évalués en 2007-2008 et décrits précédemment. On notera que le nombre de répétitions varie de 3 à 9 selon les traitements. En particulier il n'y a que 3 répétitions dans le cas des blés durs seuls N75P2 car ces traitements ne servent pas directement dans l'évaluation de la performance des associations. Par conséquent, et en raison de la place limitée sur la parcelle, nous avons choisi de n'avoir que trois répétitions pour ce traitement. Par contre nous avons 6 répétitions dans le cas des autres cultures « pures » dont la moitié ayant servi pour des prélèvements tout au long de la culture. Enfin, dans le cas des associations nous avons 9 répétitions par traitement – dont 3 pour des prélèvements en dynamique – ce qui permet de réduire le risque en cas de problème au semis ou en cours de culture. Par contre, nous n'avons que 3 répétitions dans le cas des mélanges sur le rang car cela est en partie compensé par le fait que ces parcelles sont plus larges puisque semées au semoir agricole (3 m) contre 1.84 m pour les autres associations. Notons enfin que nous n'avons que 3 répétitions pour l'association N0P1 car ce traitement devait servir initialement de parcelle de réglage pour les engins agricoles (semis et récolte) mais a finalement été intégré dans l'étude en raison de la différence de levée du blé dur L1823 par rapport à l'association N0AB*.

III. Matériels et méthodes

III.1 Protocoles expérimentaux

Cette expérimentation a été réalisée sur les parcelles expérimentales du Lycée Agricole d'Auzeville en 2007-2008 dont le précédent de culture était un tournesol et le reliquat moyen mesuré au semis sur 0-120 cm était d'environ 90 kg N ha^{-1} présentant une assez forte variabilité (écart type 24 kg N ha^{-1}). Les données climatiques et les caractéristiques des sols sont décrits en détails dans le **Chapitre II, Partie IV**. Le dispositif expérimental est construit en trois blocs correspondant chacun à une répétition. Au sein de chaque bloc, les traitements N75P2, N35P1, N0P3, N0P1 et N0AB* ont été répartis en sous-blocs de manière aléatoire et séparées par des parcelles tampons. Enfin, au sein de chaque conduite nous avons regroupé les cultures « pures » de légumineuses, les cultures « pures » de blé dur et les associations pour des raisons techniques liées au semis. Le plan expérimental de cet essai est décrit en **Annexe III**.

Culture	Variétés	Date semis	Structure du couvert	Identifiant	Densité semis (grains m^{-2})	Densité observée (plante m^{-2})	Fertilisation (kg N ha^{-1})	Traitement semences	Desherbage	Insecticide	Fongicide	Répétitions
Blé pur	Neodur	07/11/07	BBBBBBBBBBB	Nd-N75P2	336	230	40 + 35	Oui	Chimique	Non	x 2	3
				Nd-N35P1	336	216	35	Oui	Chimique	Non	Non	6
	Acalou	19/12/07	BBBBBBBBBBB	Ac-N75P2	336	207	40 + 35	Oui	Chimique	Non	x 2	3
				Ac-N35P1	336	244	35	Oui	Chimique	Non	Non	6
	L1823	07/11/07	BBBBBBBBBBB	L1823-N75P2	336	239	40 + 35	Oui	Chimique	Non	x 2	3
				L1823-N0AB*	420	125	0	Non	Herse Etrille x 2	Non	Non	6
Pois pur	Lucy	07/11/07	P P P P P P	P-N0P3	72	58	0	Oui	Chimique	x 1	x 1	6
				P-N0P1	72	59	0	Oui	Chimique	Non	Non	6
				P-N0AB*	90	75	0	Non	Herse Etrille x 2	Non	Non	6
Féverole pure	Castel	07/11/07	F F F F F F	F-N0P3	30	24	0	Oui	Chimique	x 1	x 1	6
				F-N0P1	30	24	0	Oui	Chimique	Non	Non	6
				F-N0AB*	37	25	0	Non	Herse Etrille x 2	Non	Non	6
Association Blé / Pois	Neodur / Lucy	07/11/07	Mélange sur le rang	ICPmix-NdN35P1	168 / 36	95 / 28	35	Oui	Chimique	Non	Non	3
			BPBPBPBPBPB	ICPlin-NdN35P1	168 / 36	109 / 30	35	Oui	Chimique	Non	Non	9
			PB**P**B**P**B**P**B**P**	ICPadd-NdN0P1	168 / 72	109 / 59	0	Oui	Chimique	Non	Non	9
	Acalou / Lucy	19/12/07	Mélange sur le rang	ICPmix-AcN35P1	168 / 36	85 / 9	35	Oui	Chimique	Non	Non	3
			BPBPBPBPBPB	ICPlin-AcN35P1	168 / 36	138 / 32	35	Oui	Chimique	Non	Non	9
Association Blé / Féverole	L1823 / Castel	07/11/07	BFB BFB BFB	ICFlin-L1823N0P1	168 / 15	119 / 12	0	Oui	Chimique	Non	Non	3
				ICFlin-L1823N0AB*	210 / 18	59 / 12	0	Non	Herse Etrille x2	Non	Non	9
Total												108

Tableau 19 *Description des traitements expérimentaux évalués en 2007-2008 : culture, variétés, date de semis, conduite, structure du couvert (B : Blé dur, P : Pois d'hiver, F : Féverole d'hiver), identifiant, densité semis (grains m^{-2}), densité observée (plantes m^{-2}), fertilisation (kg N ha^{-1}), traitement de semence, désherbage (chimique ou mécanique), insecticide, fongicide et nombre de répétitions par traitement.*

III.2 Mesures, analyses et calculs

III.2.1. Matière sèche, rendement et azote accumulé

Les cultures « pures » de pois d'hiver ont été récoltées manuellement à la maturité physiologique du pois d'hiver le 19 juin 2008 alors que les associations blé dur – pois d'hiver, blé dur – féverole d'hiver ainsi que les cultures « pures » de blé dur et de féverole d'hiver ont été récoltées mécaniquement le 15 juillet 2008 à la maturité physiologique du blé dur qui coïncidait avec celle de la féverole d'hiver voir **Chapitre II, Partie II** pour plus de détails.

III.2.2. Calcul des Land Equivalent Ratio

Les LER (voir **Chapitre II, Partie V** pour plus de détails) ont été calculés en considérant les valeurs des différentes répétitions pour la matière sèche, le rendement et l'N accumulé du blé dur et de la légumineuse en association et la moyenne des répétitions pour les valeurs en culture « pure », ceci de façon à éliminer la variabilité due aux seules cultures « pures ». Nous avons toujours considéré la légumineuse « pure » non fertilisée comme référence en faisant l'hypothèse que l'azote n'est pas une ressource limitante pour la légumineuse et n'affecte donc pas sa matière sèche, ni son rendement ni la quantité d'azote accumulée. Pour le blé dur, la référence utilisée a été le blé dur « pur » ayant reçu la même quantité d'azote que l'association sauf dans le cas de l'association ICPadd-NdN0P1 où la référence blé dur utilisée a été le blé dur « pur » Nd-N35P1. De même nous avons toujours considéré comme référence les cultures « pures » ayant reçu les mêmes traitements phytosanitaires que les associations sauf dans le cas de l'association ICFlin-L1823N0P1 où le blé dur « pur » L1823-N0AB* a servi de référence.

Culture	Identifiant	Référence blé dur	Référence légumineuse	LER_{BD}	LER_L	LER
Association Blé / Pois	ICPlin-NdN35P1	Nd-N35P1	P-N0P1	correct	correct	correct
	ICPmix-NdN35P1	Nd-N35P1	P-N0P1	correct	correct	correct
	ICPadd-NdN0P1	Nd-N35P1	P-N0P1	sous estimé	correct	sous estimé
	ICPlin-AcN35P1	Ac-N35P1	P-N0P1	correct	sous estimé	sous estimé
	ICPmix-AcN35P1	Ac-N35P1	P-N0P1	correct	sous estimé	sous estimé
Association Blé / Féverole	ICFlin-L1823N0P1	L1823-N0AB*	F-N0P1	sur estimé	correct	sur estimé
	ICFlin-L1823N0AB*	L1823-N0AB*	F-N0AB*	correct	correct	correct

Tableau 20 *Description des références utilisées pour le calcul du Land Equivalent Ratio (LER) pour les différentes associations et conséquence sur l'estimation des LER partiels du blé dur (LER_{BD}) et de la légumineuse (LER_L) et sur le LER total.*

Le fait de ne pas disposer, pour chaque association, des références correctes est critiquable mais cela se justifie par le fait que l'objectif de cet essai était avant tout de vérifier si les prototypes d'itinéraires techniques d'associations conçus à dire « d'experts » permettaient d'atteindre les objectifs fixés *a priori*. Ainsi, quand bien même les références choisies ne sont pas optimales elles permettent néanmoins de comparer les associations sans trop sur-estimer ou sous-estimer leur performance. Par ailleurs, cet essai visait secondairement à tester des hypothèses complémentaires concernant notamment les bio-agresseurs mais en raison des contraintes liées à la taille de la parcelle il ne nous était pas possible de tester l'ensemble des possibilités, ce qui nous a contraint à faire des choix en fonction des objectifs prioritaires de l'essai. Les références utilisées pour le calcul des LER dans les différentes associations et les conséquences sur l'estimation de leur valeur sont décrites dans le **Tableau 20** ci-dessus.

Dans le cas de l'association ICPadd-NdN0P1 la référence blé dur est Nd-N35P1 en absence de référence Nd-N0P1. Or, il est raisonnable de penser que le rendement, la matière sèche et l'azote accumulé par le blé dur Nd-N0P1 auraient été inférieurs à ceux du blé dur Nd-N35P1 du fait de l'absence de fertilisation. Par conséquent le LER partiel du blé dur est certainement légèrement sous estimé et donc le LER total également. Dans le cas des associations ICPlin-AcN35P1 et ICPmix-AcN35P1 les LER partiels du pois d'hiver ont certainement été également sous estimés puisque nous avons considéré comme référence le pois d'hiver semé le 07/11/2007 alors que ces associations ont été semées le 19/12/2007. Or, on peut penser que la matière sèche, le rendement et l'azote accumulé par le pois d'hiver semé précocement seraient supérieurs à ceux du pois d'hiver semé tardivement. Enfin, le LER partiel du blé dur dans l'association ICFlin-L1823N0P1 a été calculé en considérant comme référence le blé dur « pur » L1823-N0AB* et ceci en l'absence de référence blé dur L1823-N0P1. Par conséquent, il est probable que les valeurs de LER calculées soient légèrement sur estimées puisque l'on peut penser que la matière sèche, le rendement et l'azote accumulé par le blé dur L1823 ayant reçu un traitement de semence (N0P1) soient supérieurs à ceux du même blé dur n'ayant eu aucun intrant (N0AB*).

III.2.3. Evaluation de la pression des facteurs biotiques

III.2.3.1. Maladies

Des notations semi-quantitatives pour évaluer la pression des maladies sur blé dur et légumineuse, ont été réalisées toutes les 2 semaines à partir de début avril jusqu'à la récolte.

Dans le cas de l'anthracnose (*Mycosphaerella pinodes*) du pois d'hiver et de la féverole d'hiver, nous avons mesuré sur cinq plantes réparties sur la diagonale de chaque parcelle la surface de chaque plante atteinte par la maladie à l'aide de la grille de notation proposée par Tivoli (1994) et décrite en **Annexe V**. A la différence du protocole de Tivoli qui consiste à attribuer une note à la partie haute et une note à la partie basse puis à agréger ces deux valeurs, nous avons choisi de donner une note par tranche de 15 cm de hauteur pour le pois d'hiver et 30 cm pour la féverole d'hiver puis de les agréger. Nous avons fait de même pour les autres maladies observées.

En ce qui concerne les maladies du blé dur, des notations ont été faites sur dix plantes prises aléatoirement sur la diagonale des parcelles en considérant les trois feuilles les plus hautes de chacune de ces plantes. Les notations ont été réalisées à partir de l'abaque d'interprétation de la surface de feuilles malades proposé par Arvalis Institut du végétal et décrite en **Annexe VI**. Cette notation permet de quantifier la surface foliaire de chaque plante atteinte par la maladie.

III.2.3.2. Ravageurs

Une estimation des dégâts occasionnés par les larves de sitones sur les nodosités a été réalisée fin avril 2008 sur trois plantes par traitement à partir d'une méthode semi-quantitative. Pour ce faire nous avons prélevé un volume de terre avec les racines d'environ 20 x 20 x 20 cm que nous avons mis à tremper pendant 12h dans une solution de KCl molaire afin de faire floculer les feuillets d'argile et d'extraire plus aisément les racines. L'échantillon a ensuite été lavé sur un tamis de 1 mm de diamètre afin de récupérer larves, racines et nodosités. Nous avons ensuite déterminé le pourcentage de nodosités percées.

Par ailleurs, une quantification de la population de jeunes adultes a été réalisée à l'aide de pièges à émergence. Les pièges ont été enfoncés le 30/04/2008 de quelques centimètres dans le sol à l'emplacement de deux plantes de pois d'hiver ou d'une plante de féverole d'hiver. Trois pièges ont été répartis sur chaque parcelle d'association et quatre dans le cas

des cultures « pures » en prenant soin de les répartir sur des rangs différents. Un premier comptage des individus capturés a été réalisé le 18 juin et un second à la maturité physiologique du blé dur le 11/07/2008.

Des estimations de la population des pucerons verts du pois d'hiver (*Acyrthosiphon pisum* Harry) et des pucerons de la féverole d'hiver (*Aphis fabae* Scopoli et *Megoura viciae* Buckton) ont été réalisées les 15/04/2008 (début floraison légumineuse) et 19/05/2008 (floraison blé dur). Pour ce faire dans chaque parcelle 10 tiges ont été échantillonnées en les secouant au dessus d'un bac plastique afin de recueillir puis compter les pucerons.

III.2.3.3. Adventices

Une identification botanique des principales adventices et une mesure de leur biomasse ont été réalisées à la maturité physiologique des cultures sur l'ensemble des micro-parcelles de l'essai.

III.2.4. Evaluation économique des prototypes d'itinéraires techniques de cultures en association

III.2.4.1. Méthode de calcul de la marge directe et hypothèses

La marge directe correspond au produit de la vente des cultures auquel on ajoute les aides moins les charges opérationnelles et les charges matérielles, alors que la marge brute ne tient pas compte de ces dernières. Ces deux indicateurs ne diffèrent donc que par les charges matérielles. Or, si la marge brute est souvent utilisée comme référence elle est toutefois peu adaptée pour comparer les performances économiques de systèmes ayant des charges matérielles très différentes. Dès lors, nous avons choisi de nous focaliser sur la marge directe pour évaluer la performance économique des différents itinéraires techniques.

III.2.4.2. Droits à paiement unique et aides

Nous avons intégré dans notre calcul les **Droits à Paiement Unique** (DPU) à hauteur de **300 € ha^{-1}** auxquels s'ajoutent (Source : Domaine agricole de l'INRA Auzeville 2009) :

- **Aide surface :** 77 € ha^{-1} correspondant à l'aide aux surfaces de grandes cultures non irriguées corrigé d'un coefficient de 0.97 correspondant à l'abattement de surface en Midi-Pyrénées soit 75 € ha^{-1}.

- **Aide blé dur :** 71 € ha^{-1} pour le supplément blé dur corrigé d'un coefficient de 0.65 correspondant à l'abattement de surface en Midi-Pyrénées soit 46 € ha^{-1}.

- **Aide qualité blé dur :** 40 € ha^{-1} pour la prime spéciale à la qualité pour le blé dur dans les zones de production traditionnelle également corrigé d'un coefficient de 0.65 soit 26 € ha^{-1}.

- **Aide protéagineux :** 56 € ha^{-1} pour le supplément protéagineux sans coefficient d'abattement de surface.

Rq : Pour les associations nous avons considéré qu'elles étaient éligibles aux aides blé dur lorsque le rendement du blé dur était supérieur à celui de la légumineuse et aux aides protéagineux dans le cas contraire (cas des associations blé dur – pois d'hiver additive et blé dur – féverole d'hiver). Nous avons aussi pris en compte leur inéligibilité à la prime spéciale qualité puisque le blé dur associé n'est semé qu'à 168 grains m^{-2} et que cette prime exige un minimum de 220 grains m^{-2}.

III.2.4.3. Charges matérielles

Les charges matérielles pour les différentes opérations culturales ont été estimées à partir du barème d'entraide (Source : FDSEA Moselle 2009) en considérant la traction et la main d'œuvre sur la base d'un outillage standard et d'une utilisation moyenne du matériel :

- **Labour :** 60 € ha^{-1}.
- **Reprise du labour :** 80 € ha^{-1} (2 passages de herse rotative).
- **Semis :** 40 € ha^{-1} et 80 € ha^{-1} pour les associations en ligne semées en deux fois.
- **Roulage :** 13 € ha^{-1}.
- **Pulvérisateur :** 12 € ha^{-1} par passage (désherbage, fongicide et insecticide) soit 12 € ha^{-1} pour N0P1 et 36 € ha^{-1} pour N75P2 et N0P3.
- **Désherbage mécanique :** 24 € ha^{-1} pour les deux passages herse étrille (N0AB*).
- **Epandeur :** 10 € ha^{-1} par passage soit 10 € ha^{-1} pour N35P1 et 20 € ha^{-1} pour N75P2.
- **Récolte :** 80 € ha^{-1}.
- **Déchaumage :** 21 € ha^{-1} par déchaumage soit 63 € ha^{-1} au total.
- **Transport :** 4 € t^{-1} ha^{-1}.

Pour les associations, une charge matérielle supplémentaire pour le **tri des grains** après la récolte à été inclue dans le calcul à hauteur de **50 € t^{-1}** (Source : GNIS 2009).

III.2.4.4. Charges opérationnelles

Les charges opérationnelles ont été estimées à partir des données du domaine agricole de l'INRA Auzeville :

- **Semences blé dur :** 110 € ha^{-1} pour les semences de blé dur sur la base d'une densité de semis de 340 grains m^{-2} soit 138 € ha^{-1} pour le blé dur « pur » N0AB* semé à 420 grain m^{-2}, 55 € ha^{-1} pour les associations semées à 170 grains m^{-2} et 69 € ha^{-1} pour le blé dur en association N0AB* semé à 210 grains m^{-2}.
- **Semences pois d'hiver :** 110 € ha^{-1} pour les semences de pois d'hiver sur la base d'une densité de semis de 72 grains m^{-2} soit 138 € ha^{-1} pour le pois d'hiver « pur » N0AB* semé à 90 grains m^{-2}, 55 € ha^{-1} pour le pois d'hiver en association semé à 36 grains m^{-2} et 110 € ha^{-1} pour le pois d'hiver en association additive semé à 72 grains m^{-2}.
- **Semences féverole d'hiver :** 80 € ha^{-1} pour les semences de féverole d'hiver sur la base d'une densité de semis de 30 grains m^{-2} soit 100 € ha^{-1} pour la féverole d'hiver « pure » N0AB* semée à 38 grains m^{-2}, 40 € ha^{-1} pour la féverole d'hiver en association semée à 15 grains m^{-2} et 50 € ha^{-1} pour la féverole d'hiver en association N0AB* semée à 19 grains m^{-2}.
- **Engrais azoté :** 1.33 € kg^{-1} d'azote soit 47 € ha^{-1} en N35P1 et 100 € ha^{-1} en N75P2.

- **Désherbage chimique :** 23 € ha^{-1} pour le désherbage chimique en N0P1, N75P2 et N0P3.

- **Insecticide :** 14 € ha^{-1} pour le traitement insecticide sur les légumineuses N0P3.

- **Fongicide :** 34 € ha^{-1} pour le traitement fongicide sur les légumineuses N0P3 et 88 € ha^{-1} pour les deux traitements fongicides sur les blés durs dur N75P2.

III.2.4.5. Prix du produit brut

La marge directe a été calculée sur la base d'un prix moyen des productions en tenant compte des prix pratiqués sur la période 2004-2007, mais en excluant la flambée des prix conjoncturelle observée à partir de juillet 2007. Nous avons donc considéré pour le blé dur un prix de vente de 145 € t^{-1} en conventionnel (Source : Arterris 2009) et 190 € t^{-1} pour les productions sans intrant (N0AB* ; Source : Agribio Union 2009) apparentées à des productions d'agriculture biologique. Pour le pois d'hiver et la féverole d'hiver nous avons opté pour un prix de 130 € t^{-1} en conventionnel et 240 € t^{-1} en agriculture biologique. Contrairement à une idée reçue, le plus fort différentiel de prix entre le système conventionnel et l'agriculture biologique se situe au niveau des légumineuses et non du blé dur.

Pour le blé dur, nous avons calculé les bonus et malus liés à la qualité des grains en considérant des grilles différenciées pour les grains conventionnels et ceux en agriculture biologique (N0AB*) ; cf. **Annexe VII** pour plus de détails. L'humidité des grains à la récolte, le pourcentage d'impuretés ainsi que le pourcentage des grains mouchetés, germés ou fusariés étant inférieurs aux seuils maximum autorisés nous n'avons pas appliqué de malus sur ces critères.

En agriculture biologique tout comme pour les systèmes conventionnels, des malus sont appliqués sur le poids spécifique selon des grilles identiques. Ces malus peuvent atteindre un maximum de 30 € t^{-1} lorsque le PS est inférieur à 69 kg hl^{-1}.

En **système conventionnel,** des bonus sont appliqués si la teneur en protéines est supérieure à 14% de la matière sèche à 0% d'humidité, ce que nous n'avons pas observé dans nos essais. Par contre, une grille spécifique pour le mitadinage est utilisée pouvant entraîner des malus au maximum de 30 € t^{-1} lorsque ce taux est supérieur à 60%.

En **agriculture biologique,** les bonus ont été calculés sur le prix de base en considérant la teneur en protéines lorsque celle-ci est supérieure à 10% et le taux de mitadinage par rapport au seuil de 25%. Il est important de noter que l'augmentation de la teneur en protéines et la réduction du taux de mitadinage permettent une valorisation économique importante pouvant atteindre 135 € t^{-1} sur un prix de base de 190 € t^{-1}.

IV. Evaluation quantitative et qualitative des prototypes d'itinéraires techniques de culture en association

IV.1 Accumulation de l'azote dans les parties aériennes

Si l'on se focalise dans un premier temps sur les cultures monospécifiques, on observe que la quantité d'azote accumulée par le pois d'hiver (**Figure 38**) est la même qu'il ait été cultivé sans intrant de synthèse (N0AB*), avec un désherbage chimique et un traitement de semence (N0P1) ou comme N0P1 mais avec également un traitement insecticide et un traitement fongicide (N0P3). Par contre, dans le cas de la féverole d'hiver la quantité d'azote

accumulée est légèrement supérieure dans les traitements N0P1 et N0P3 comparativement au traitement N0AB*.

Concernant les cultures « pures » de blé dur, on observe que la quantité d'azote accumulée est supérieure en situation avec 75 kg N ha^{-1} (N75P2) comparativement aux traitements avec uniquement 35 kg N ha^{-1} (N35P1) et ceci que l'on se place dans le cas d'un semis ayant été réalisé à une date normale (NdN35P1 et NdN75P2) ou dans le cas d'un semis tardif avec Acalou (AcN35P1 et AcN75P2). On remarque par ailleurs, que la quantité d'azote accumulée par le blé dur semé tardivement est inférieure à celle du blé dur semé précocement ce qui peut également être confondu avec un effet variété.

On remarque enfin que la quantité d'azote accumulée par les associations est maximale dans le cas de l'association ICPadd-NdN0P1 qui correspond à une pleine densité de pois d'hiver et une demi-densité de blé dur et dans le cas des associations de L1823 avec la féverole d'hiver en N0AB* et N0P1. A l'inverse, la quantité d'azote accumulée est minimale dans le cas du semis tardif en « vrac » (ICPmix-AcN35P1) en raison de la quantité très faible d'azote accumulée par le pois d'hiver. Entre ces deux situations, la quantité d'azote accumulée par les associations ICPlin-NdN35P1, ICPlin-AcN35P1 et ICPmix-NdN35P1 sont statistiquement similaires même s'il semble qu'elle soit légèrement plus élevée dans le cas de l'association en ligne semée à une date normale (ICPlin-NdN35P1) et ceci en raison d'une quantité d'azote accumulée par le pois d'hiver associé légèrement supérieure.

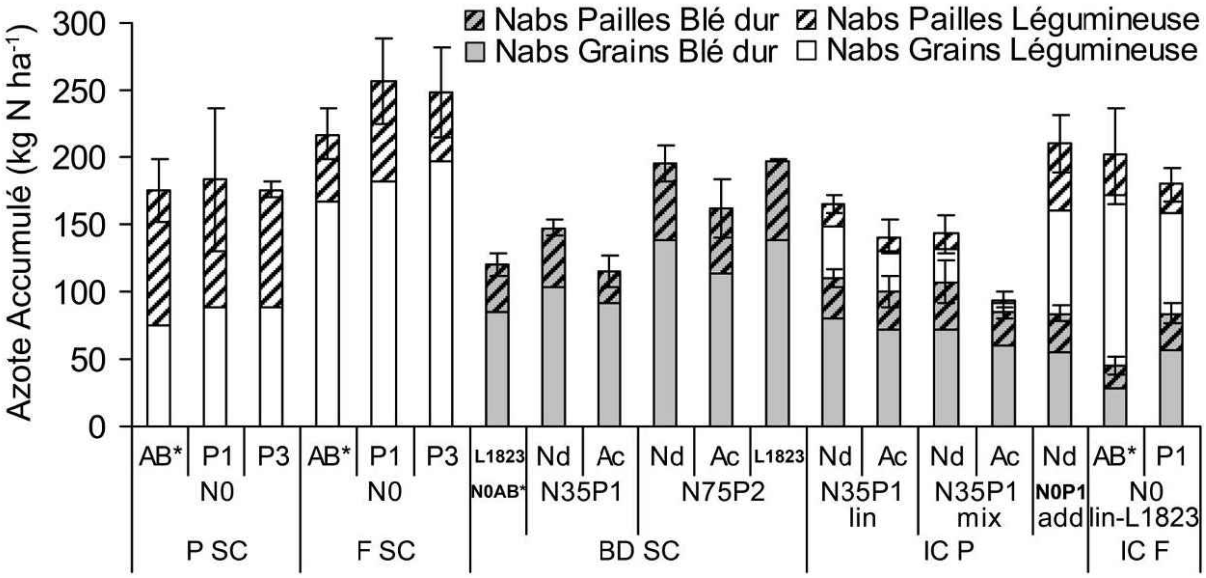


Figure 38 *Azote accumulé (kg N ha^{-1}) dans les pailles et les grains du pois d'hiver et du blé dur en culture « pure » (SC) et en association (IC) pour les différents traitements. Les valeurs sont la moyenne de n=3 à 6 ± écart type calculé sur l'azote total accumulé (pailles + grains) par le blé dur et par le pois d'hiver.*

IV.2 Matière sèche et rendement

Comme précédemment, on observe que le rendement et la matière sèche du pois d'hiver sont comparables pour les trois itinéraires techniques de pois d'hiver « purs » testés (**Figure 39**). Notons que l'indice de récolte du pois d'hiver est minimal en situation sans intrant (0.31) contre 0.35 dans les situations N0P1 et N0P3. Dans le cas de cultures « pures » de féverole d'hiver, la matière sèche est légèrement supérieure mais de façon non significative en N0P1 par rapport aux itinéraires techniques N0AB* et N0P3. Par contre l'indice de récolte de la féverole d'hiver est minimal en N0P1 (0.42), maximal en N0P3 (0.51) et intermédiaire en N0AB* (0.46).

Dans le cas du blé dur en culture « pure », on remarque que l'apport de 40 kg N ha^{-1} dans les situations N75P2 au stade épi 1 cm du blé dur a permis d'accroître significativement la production de matière sèche de 22 % pour Neodur et 51% pour Acalou. Cet apport d'azote a également permis d'augmenter le rendement de 24% et 21% pour Neodur et Acalou respectivement. Ces résultats montrent donc que l'indice de récole de Neodur est similaire en N35P1 et N75P2 (0.46) alors que celui du blé dur Acalou est de 0.56 en N35P1 contre 0.50 en N75P2.

En ce qui concerne les associations, on remarque que le rendement de l'association semée tardivement et en « vrac » avec Acalou est le plus faible (2.7 t ha^{-1}) alors que celui des autres associations est compris entre 3.8 et 4.4 t ha^{-1}. D'un point de vue de la production de matière sèche, celle-ci est également minimale pour l'association ICPmix-AcN35P1 (5.5 t ha^{-1}), maximale pour les associations ICFlin-L1823N0P1, ICPlin-NdN35P1 et ICPadd-NdN0P1 (9.3 t ha^{-1} en moyenne) et intermédiaire dans le cas des mélanges ICFlin-L1823N0AB*, ICPlin-AcN35P1 et ICPmix-NdN35P1 (8.2 t ha^{-1} en moyenne). Il est important de noter que les différentes associations diffèrent fortement quant à la proportion de la légumineuse dans le mélange final aussi bien d'un point de vue de la matière sèche totale que du rendement. Le pourcentage de pois d'hiver dans la biomasse totale ou le rendement total de l'association est de seulement 7% pour l'association ICPmix-AcN35P1, alors qu'il est compris entre 16 et 23% pour les mélanges ICPlin-NdN35P1, ICPlin-AcN35P1 et ICPmix-NdN35P1 et qu'il est très significativement supérieur dans le cas de l'association ICPadd-NdN0P1 avec près de la moitié du poids des graines (46%). Par contre, la proportion de féverole d'hiver dans le rendement de l'association est de 69% en N0AB* et de 37% en N0P1.

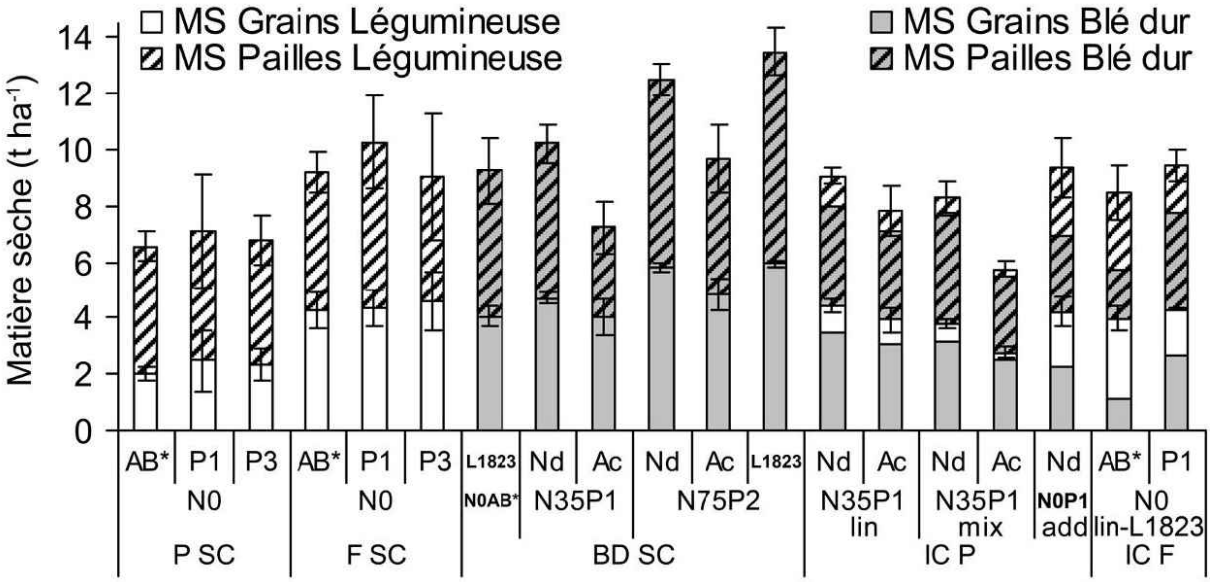


Figure 39 *Matière sèche (t ha^{-1}) des pailles et des grains du pois d'hiver et du blé dur en culture « pure » (SC) et en association (IC) pour les différents traitements. Les valeurs sont la moyenne de n=3 à 6 ± écart type calculé sur le rendement et sur la matière sèche totale.*

IV.3 Land Equivalent Ratio pour l'azote accumulé et le rendement

Les LER calculés à partir du rendement (**Figure 40a**) sont supérieurs ou égaux à 1 à l'exception des associations en mélange sur le rang semées tardivement avec Acalou (ICPmix-AcN35P1) pour laquelle le LER total est de 0.70. Dans le cas de l'association en « vrac » avec Neodur et des associations de L1823 avec la féverole d'hiver en N0AB* et N0P1 les LER ne sont pas significativement différents de 1 avec respectivement des valeurs de 0.94, 0.95 et 1.02. Dans le cas des associations semées en ligne (ICPlin-NdN35P1 et

ICPlin-AcN35P1) les valeurs sont supérieures à 1.1. Enfin, on observe que tous les points se situent dans la zone ou le blé dur réduit le rendement du pois d'hiver (LER_{Y-P}<0.5 et LER_{Y-B}>0.5) à l'exception de l'association avec la féverole d'hiver N0AB* où c'est l'inverse. Dans le cas de l'association additive (ICPAdd-NdN0P1) le LER total est maximum avec une valeur de 1.29 et un LER partiel du pois d'hiver de 0.81 qui indique que le blé dur a entraîné une perte de seulement 19% du rendement du pois d'hiver par rapport à la culture « pure » puisque celui-ci a été semé dans cette association à la même densité.

Lorsque l'on considère la quantité d'azote accumulée dans les parties aériennes, on observe que le LER_N est inférieur à celui du LER_Y pour l'association ICPlin-NdN35P1, supérieur pour l'association ICPmix-AcN35P1 et les associations de L1823 avec la féverole d'hiver et identique pour les autres mélanges. On observe ainsi sur la **Figure 40b** que les LER_N sont inférieurs à 1 pour les associations en « vrac » alors que pour les associations en ligne et avec la féverole d'hiver les valeurs sont significativement supérieures à 1 (1.08 en moyenne) et très significativement dans le cas du mélange additif dont le LER est de 1.27.

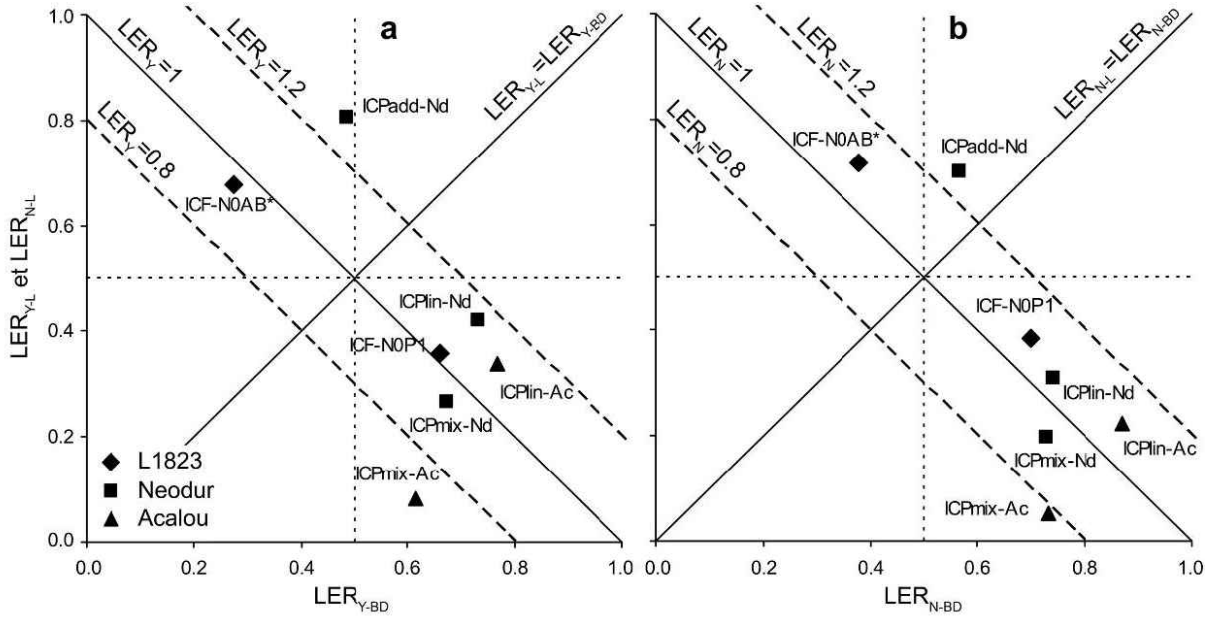


Figure 40 *Land equivalent ratio partiel de la légumineuse (LER_L) en fonction du land equivalent ratio partiel du blé dur (LER_{BD}) calculés à partir a) du rendement (LER_Y) ou b) de l'azote accumulé dans les parties aériennes (LER_N) pour les différents traitements. Les valeurs sont la moyenne de n=3 à 6 ± écart type. Une valeur de LER supérieure à 1 indique que l'association est plus efficace que les cultures pures du point de vue du rendement ou de l'azote accumulé et vice versa. Une valeur de LER partiel inférieure à 0.5 indique que le rendement ou l'azote accumulé d'une espèce (par plante ou par rang) est inférieur dans l'association par rapport à la culture « pure » (voir* ***Chapitre II, Partie V, Figure 4*** *pour plus de détails).*

IV.4 Effet des associations sur la teneur en protéines des grains

On observe (**Tableau 21**) que la teneur en protéines du blé dur « pur » est supérieure dans les situations fertilisée avec 75 kg N ha^{-1} (N75P2) par rapport aux situations fertilisées avec seulement 35 kg N ha^{-1} (N35P1) et dans le cas de L1823 par rapport à l'absence de fertilisation (N0AB*). Par ailleurs, on n'observe pas de différence significative entre les cultivars de blé dur Neodur et Acalou aussi bien en N75P2 que N35P1.

Dans le cas des associations, la teneur en protéines du blé dur est comparable pour les traitements en ligne et en « vrac », et ce, pour les deux cultivars. Par contre, la teneur en protéines du blé dur Neodur est supérieure dans le cas de l'association additive

comparativement aux autres associations blé dur – pois d'hiver. De façon générale, on remarque qu'il faut, en culture « pure », apporter 40 kg N ha^{-1} de plus qu'en association pour obtenir la même teneur en protéines que le blé dur associé et 75 kg N ha^{-1} de plus si l'on compare avec l'association additive non fertilisée. Concernant la lignée L1823, par rapport à la culture « pure » N0P1, l'association avec la féverole d'hiver en N0AB* a permis d'augmenter la teneur en protéines du blé dur ce qui n'est pas le cas dans l'association N0P1. D'ailleurs, dans l'association N0AB* la teneur en protéines du blé dur est supérieure à celle observée en culture « pure » avec un apport de 75 kg N ha^{-1}.

Enfin, la teneur en protéines du pois d'hiver est comparable dans les traitements N0AB* et N0P3 mais est légèrement inférieure pour l'association N0P1 même si cette différence n'est pas significative. Dans le cas de la féverole d'hiver seule, la teneur en protéines est inférieure en N0AB* comparativement aux traitements N0P1 et N0P3 mais la encore la différence n'est pas significative. Par ailleurs, l'association blé dur – pois d'hiver n'a pas permis d'améliorer la teneur en protéines de la légumineuse à l'exception toutefois de l'association additive. Par contre les associations blé dur – féverole d'hiver ont permis d'augmenter légèrement la teneur en protéines de la légumineuse, et ce, aussi bien en N0AB* qu'en N0P1.

Itinéraire technique	Identifiant		Blé dur (% N * 5.7)	Légumineuse (% N * 6.25)
Blé dur "pur"	N0AB*	L1823	11.9 ± 0.9	
	N35P1	Neodur	12.5 ± 0.5	
		Acalou	12.9 ± 0.6	
	N75P2	Neodur	13.5 ± 0.4	
		Acalou	13.3 ± 0.2	
		L1823	13.3 ± 0.7	
Pois d'hiver "pur"	N0AB*			23.5 ± 1.0
	N0P1			22.8 ± 1.3
	N0P3			23.9 ± 1.1
Féverole d'hiver "pure"	N0AB*			24.8 ± 2.1
	N0P1			26.1 ± 1.5
	N0P3			27.1 ± 2.0
Association blé dur-pois d'hiver	N0P1-add	Neodur	13.9 ± 0.4	24.5 ± 0.5
	N35P1-lin	Neodur	13.3 ± 0.6	23.7 ± 1.3
		Acalou	13.4 ± 0.4	22.7 ± 0.9
	N35P1-mix	Neodur	13.1 ± 1.1	23.9 ± 0.7
		Acalou	13.7 ± 0.4	23.3 ± 1.1
Association blé dur-féverole d'hiver	N0AB*	L1823	14.9 ± 0.7	27.5 ± 1.7
	N0P1	L1823	12.1 ± 0.5	28.3 ± 0.9

Tableau 21 *Teneur en protéines du blé dur, du pois d'hiver et de la féverole d'hiver en culture « pure » ou en association pour les différents itinéraires techniques. Les valeurs sont la moyenne de n=3 à 6 ± écart type*

La **Figure 41a** indique que la teneur en protéines du blé dur fertilisé avec 35 kg N ha^{-1} (N35) est négativement corrélée au rendement aussi bien en culture « pure » qu'en association avec le pois d'hiver. On observe par ailleurs que les cultures « pures » ayant reçu 75 kg N ha^{-1} ont une réponse différente alors que le blé dur dans l'association additive non fertilisée (ICPadd-NdN0P1) présente une réponse similaire aux situations N35. Enfin, sur la **Figure 41b**, on observe qu'en absence de fertilisation azotée la teneur en protéines du blé dur L1823 n'est pas corrélée linéairement avec le rendement à ceci près que la teneur en protéines très élevée dans l'association blé dur – féverole d'hiver N0AB* s'explique par le rendement très faible. Par contre, la différence de rendement entre le blé dur « pur » N0AB* et le blé dur

associé N0P1 ne s'est pas traduit par un accroissement significatif de la teneur en protéines du blé dur. On remarquera enfin que le blé dur « pur » L1823 fertilisé avec 75 kg N ha^{-1} a une teneur en protéines intermédiaire.

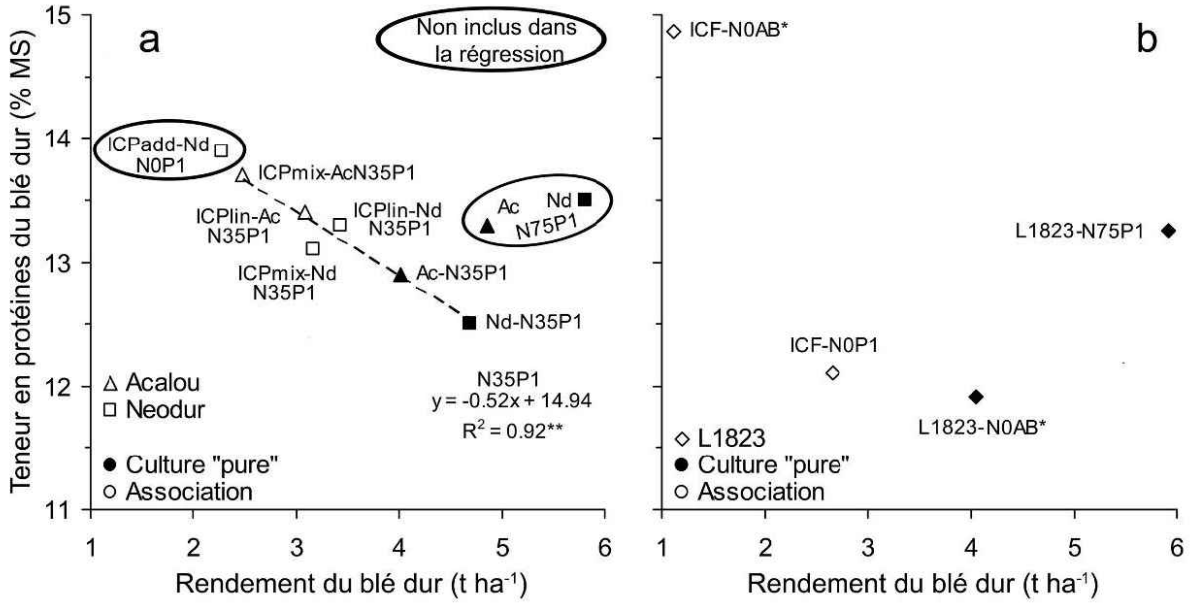


Figure 41 *Teneur en protéines du blé dur (en % de la matière sèche) en fonction du rendement du blé dur à 0% d'humidité en culture « pure » et en association avec a) le pois d'hiver et b) la féverole d'hiver. Les valeurs sont la moyenne de n=3 à 6. La régression linéaire (a) a été obtenue en considérant l'ensemble des traitements N35P1. '**' indique que la régression est significative à P=0.01.*

IV.5 Effet des associations sur le reliquat azoté à la récolte

Des échantillons de sol ont été prélevés sur 0-120 cm (cf. **Chapitre II, Partie III** pour plus de détails) quelques jours après la récolte le 23 juillet 2008. En raison de la variabilité des mesures et pour faciliter l'analyse des résultats, nous avons choisi de regrouper les traitements de pois d'hiver et de féverole d'hiver « purs » ainsi que les blés durs « purs » Neodur et L1823 en N75P2 semés à la même date, ce qui est acceptable en raison des niveaux de biomasse et des quantités d'azote accumulées relativement proches.

Les reliquats d'azote à la récolte sont supérieurs pour les cultures « pures » de légumineuse sans différence significative entre la féverole d'hiver et le pois d'hiver (56 et 61 kg N ha^{-1} respectivement) (**Figure 42**). Dans le cas des cultures « pures » de blé dur, le reliquat azoté est légèrement supérieur, mais non significativement différent, dans les traitements fertilisés avec 75 kg N ha^{-1} (42 kg N ha^{-1} d'azote minéral sur 0-120 cm) comparativement aux traitements sans fertilisation azotée (N0AB*) ou avec 35 kg N ha^{-1} dont les reliquats ont été en moyenne de 34 kg N ha^{-1}. Par ailleurs, nous n'observons pas de différence entre les semis tardifs avec Acalou et les semis précoces (Neodur et L1823) aussi bien en N75P2 que N35P1.

Concernant les associations, les mélanges en ligne N35P1 et l'association additive non fertilisée ont un reliquat azoté d'environ 33 kg N ha^{-1}, ce qui est légèrement inférieur mais non significativement différent, au reliquat des associations en mélange sur le rang N35P1 et de l'association blé dur – féverole d'hiver N0AB* qui est de 41 kg N ha^{-1} en moyenne. Ainsi, les associations ont permis de réduire le reliquat azoté à la récolte comparativement aux cultures « pures » de légumineuses mais ont des reliquats comparables aux couverts monospécifiques de blé dur ayant reçu la même fertilisation azotée.

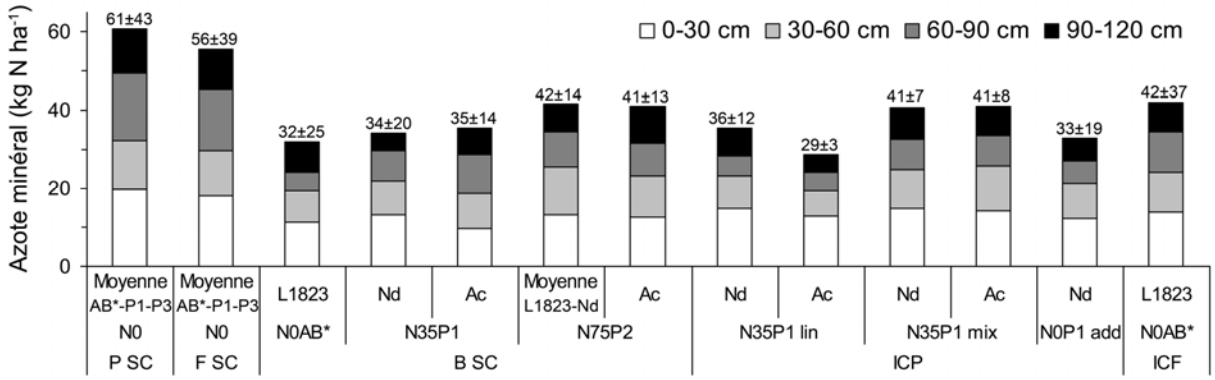


Figure 42 *Quantité d'azote minéral (nitrate + ammonium) sur 0-120 cm en kg N ha^{-1} par horizon mesurée à la récolte pour les différents traitements. Les valeurs au dessus des barres correspondent à la quantité total d'azote minéral en moyenne pour les trois blocs sur 0-120 cm ± écart type. Pour les cultures « pures » de légumineuses nous avons considéré la moyenne des traitements N0AB*, N0P1 et N0P3 et dans le cas de la culture « pure » de blé dur N75P1 semée à la date normale la moyenne des cultivars L1823 et Neodur.*

V. Evaluation des associations pour la lutte contre les bio-agresseurs

L'acquisition et le traitement de ces résultats ont été rendus possibles grâce à l'aide de Xavier Auzuret qui a réalisé son stage de fin d'étude d'ingénieur de l'ENSAT en 2008 sur cet essai encadré par Eric Justes et moi-même.

V.1 Cas des maladies foliaires

V.1.1. Cas des maladies foliaires du blé dur

La septoriose (*Septoria tritici* et *Septoria nodorum*) a été la maladie majoritairement observée sur le blé dur représentant 93% des maladies foliaires contre environ 3.5% pour la rouille brune et 3.5% pour l'oïdium au 22 mai. Notons également qu'en fin de cycle de la fusariose sur épi a été observée. Les **Figures 43a et 43b** indiquent que le développement de la septoriose n'a commencé qu'à partir du 7 mai soit seulement une semaine avant la floraison du blé dur et ce aussi bien dans le cas d'un semis précoce que d'un semis tardif.

La variété Neodur a eu des notes de maladies inférieures à celles de la variété Acalou en culture « pure » (**Figure 43a**) et ceci aussi bien en situation N35P1 que N75P2. Par ailleurs, on observe que, si dans le cas de Neodur le traitement N75P2 présente un niveau d'attaque significativement plus faible que celui du traitement N35P1, de telles différences n'ont pas été observées avec le cultivar Acalou semé tardivement. Enfin on remarque que la lignée L1823 présente un niveau de symptômes comparable à Acalou en N75P2 et qu'elle a eu un niveau très réduit de dégâts en N0AB*.

Concernant les associations (**Figure 43b**), on observe comme précédemment que les associations avec la variété Acalou semée tardivement présentent des niveaux d'attaque de septoriose supérieurs aux associations avec la variété Neodur et ceci aussi bien dans le cas des associations en ligne (ICPlin-NdN35P1 et ICPlin-AcN35P1) qu'en mélange sur le rang (ICPmix-NdN35P1 et ICPmix-AcN35P1). On remarque par ailleurs que le niveau de maladie du blé dur est inférieur dans le cas de l'association additive (ICPadd-NdN0P1)

comparativement aux associations également cultivées avec Neodur (ICPlin-NdN35P1 et ICPmix-NdN35P1).

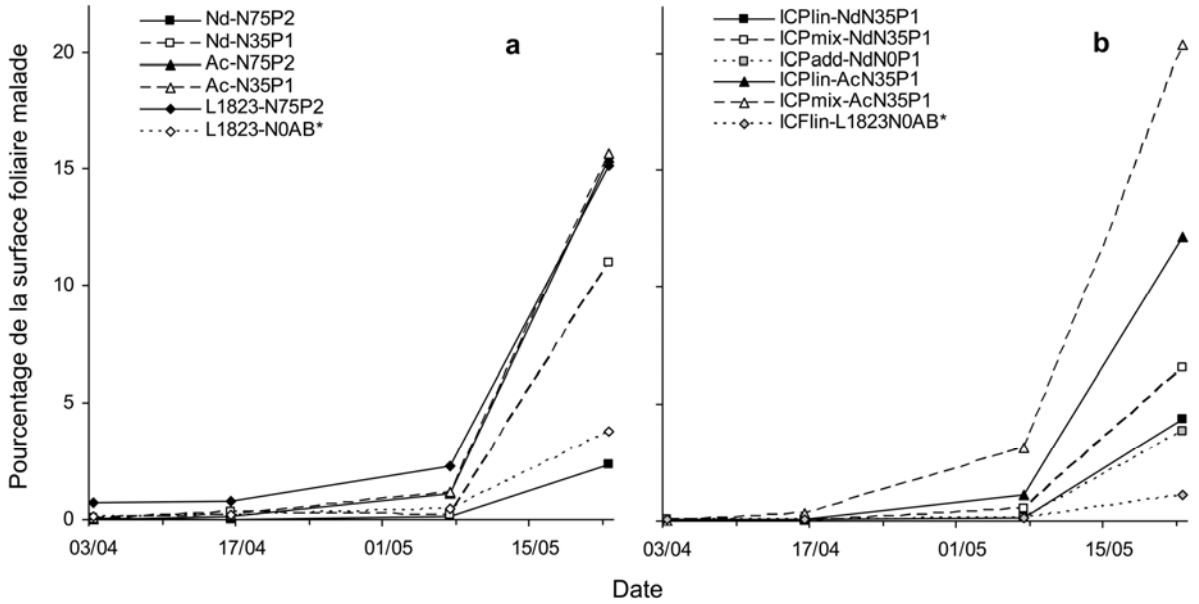


Figure 43 *Evolution du pourcentage de la surface foliaire des feuilles du blé dur atteinte par la septoriose (moyenne des trois dernières feuilles émises) en : a) culture « pure » et b) culture associée pour les différents traitements. Les valeurs sont la moyenne de n=3 à 9.*

Le blé dur L1823 dans l'association avec la féverole d'hiver N0AB* est celui qui a le moins de surface foliaire présentant des symptômes de septoriose ce qui indique un effet positif de l'association comparativement aux cultures « pures » avec cette même lignée (L1823N0AB* et L1823N0P1). Enfin, on remarque que le blé dur Acalou en association sur la ligne présente un niveau de maladie inférieur aux cultures « pures », ce qui n'est pas le cas de l'association en mélange sur le rang. Dans le cas des associations avec Neodur, les mélanges en ligne, en « vrac » et additifs ont des niveaux d'attaque supérieurs au blé dur en N75P2 mais inférieurs au traitement de référence en culture « pure » (N35P1).

V.1.2. Cas des maladies foliaires du pois d'hiver et de la féverole d'hiver

L'anthracnose a été la maladie majoritairement observée sur le pois d'hiver représentant 98% des maladies foliaires contre seulement 2% pour la rouille. Notons qu'en fin de cycle nous avons observé la présence limitée de mildiou et d'oïdium sur quelques parcelles. Dans le cas de la féverole d'hiver, l'anthracnose a également été la maladie principalement observée jusqu'au 22 mai avec 98% des symptômes avant que ne se développe la rouille en fin de cycle qui représentait au 5 juin 30% des dégâts foliaires. Les **Figures 44a et 44b** montrent que le développement de l'anthracnose a commencé sur le pois d'hiver à partir du 15 avril dans le cas des semis précoces et à partir du 6 mai dans le cas des associations semées tardivement et à une date intermédiaire dans le cas de la féverole d'hiver en « pure » et en association. Par ailleurs, nous n'avons pas observé de différence entre les différentes cultures « pures » de pois d'hiver indiquant que le traitement de semence (N0P1 et N0P3) et le traitement fongicide effectué le 13 mai 2008 sur le pois d'hiver N0P3 n'ont pas permis de prévenir le développement de la maladie comme souhaité. A contrario, dans le cas de la féverole d'hiver « pure » le développement de l'anthracnose a été moindre que sur le pois d'hiver et semble avoir été réduit par le traitement fongicide en N0P3 alors que le seul traitement de semence en N0P1 n'a pas eu d'effet (comparativement à la situation N0AB*).

Dans le cas des associations blé dur – pois d'hiver (**Figure 44b**), on observe que l'apparition des symptômes de maladie a été, comme nous l'avons vu précédemment, plus

tardive de dix à quinze jours dans le cas des semis décalés avec Acalou, comparativement aux semis précoces avec Neodur. Cette observation est vraie aussi bien dans le cas des semis en ligne que des semis en mélange sur le rang. On observe un niveau de maladie légèrement supérieur dans le cas des associations en mélange sur le rang comparativement aux mélanges en ligne et ceci pour les deux dates de semis. Enfin, les maladies foliaires du pois d'hiver semblent avoir été accrues dans le cas de l'association additive (ICPadd-NdN0P1) comparativement aux autres associations avec Neodur (ICPmix-NdN35P1 et ICPlin-NdN35P1). La féverole d'hiver associée à L1823 présente quand à elle un niveau d'anthracnose intermédiaire, à savoir supérieur à celui du pois d'hiver semé tardivement avec Acalou mais inférieur à celui du pois d'hiver semé à une date normale avec Neodur.

Toutefois, le niveau de maladie est significativement plus bas dans les associations blé dur – pois d'hiver que dans les cultures « pures » de pois d'hiver et ceci quels que soient les dates de semis, blés durs associés ou structures du couvert. Cependant, dans le cas de l'association additive la pression de maladie a été sensiblement la même que celle observée en culture « pure » ce qui pourrait indiquer un effet de la densité de plantes et de la structure du couvert sur le développement de l'anthracnose du pois d'hiver. De même l'association blé dur – féverole d'hiver n'a pas permis de réduire la pression de l'anthracnose comparativement aux cultures « pures » de cette légumineuse.

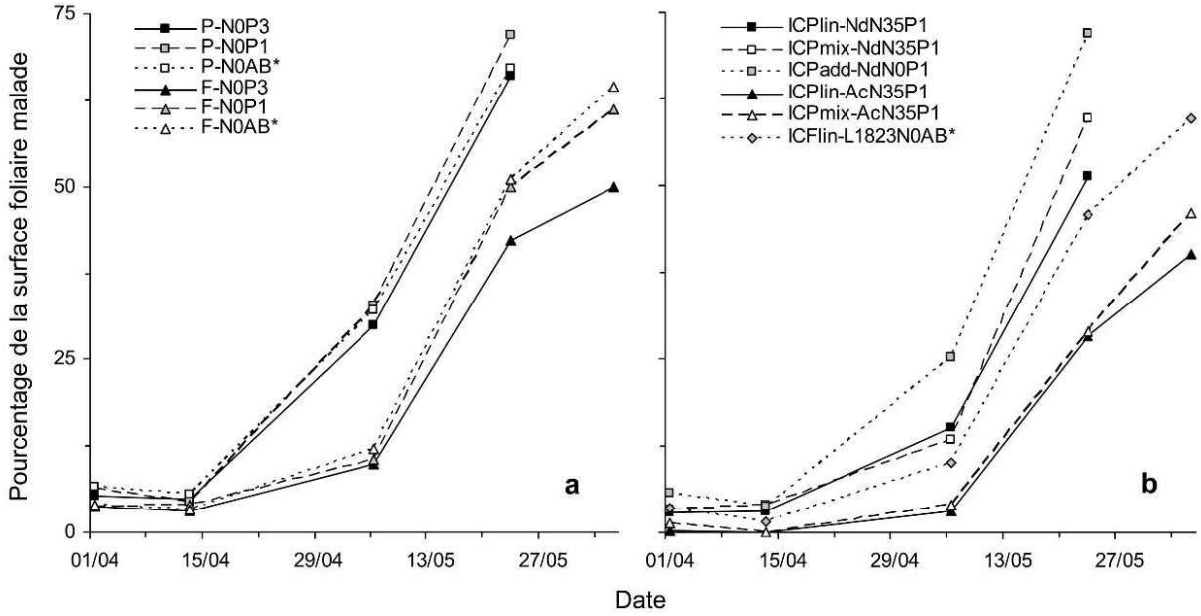


Figure 44 *Evolution du pourcentage de la surface foliaire des feuilles du pois d'hiver et de la féverole d'hiver atteinte par l'anthracnose en : a) culture « pure » et b) culture associée pour les différents traitements. Les valeurs sont la moyenne de n=3 à 9.*

V.2 Cas des pucerons et des sitones du pois d'hiver et de la féverole d'hiver

V.2.1. Cas des sitones du pois d'hiver et de la féverole d'hiver

Les comptages du nombre de larves effectués après nettoyage des racines sur un tamis de 1 mm n'a pas permis de mettre en évidence de différences significatives entre les traitements aussi bien en cultures « pures » qu'en association (**Figure 45**). Il semblerait toutefois que le nombre de larves soit supérieur dans le cas des cultures sans intrant (N0AB*) comparativement aux autres cultures « pures » et aux associations et ce aussi bien pour le pois d'hiver que pour la féverole d'hiver.

Le pourcentage de nodosités percées – qui est un indicateur du niveau de pression exercée par les sitones – montre que les cultures « pures » de pois d'hiver sans intrant (N0AB*) et N0P1 sont significativement plus attaquées que la culture « pure » N0P3 et il semble en être de même pour la féverole d'hiver même si la différence n'est là pas significative. Par ailleurs les pois d'hiver « purs » N0P1 et N0AB* semblent plus attaqués que les pois d'hiver en association alors que l'on observe l'inverse pour la féverole d'hiver. Par ailleurs, aucune différence significative n'a pu être mise en évidence entre les associations blé dur – pois d'hiver mais l'on observe que la féverole d'hiver associée à un pourcentage de nodosités percées supérieur à celui des pois d'hiver associés.

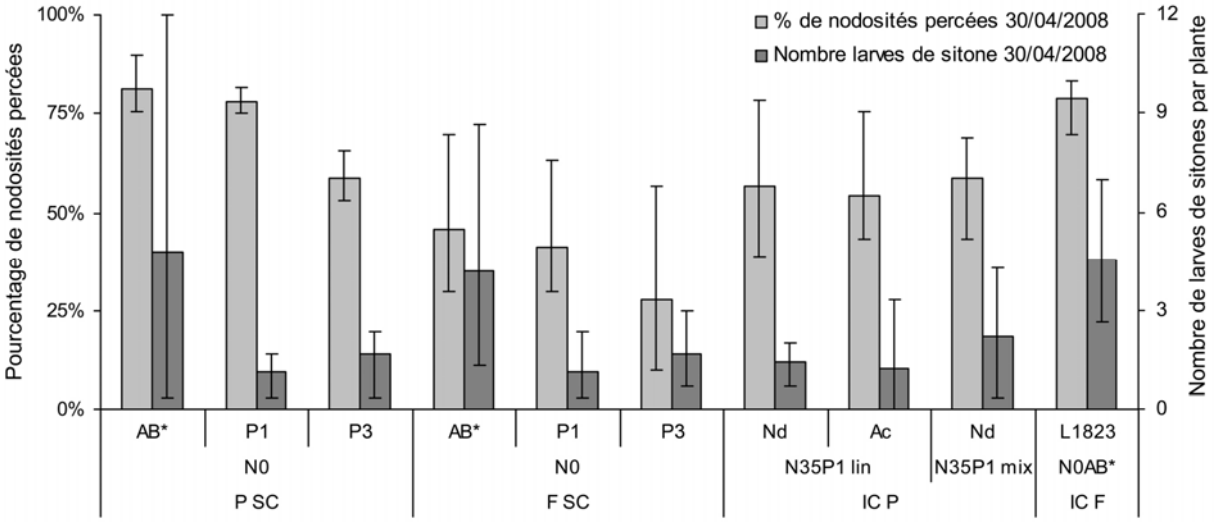


Figure 45 *Pourcentage de nodosités percées et nombre de larves présentes par plante dans les nodosités au 30/04/2008 dans les cultures « pures » de pois d'hiver (P SC) et de féverole d'hiver (F SC) et les associations avec le blé dur (IC P et IC F). Les valeurs sont la moyenne de n=3. Les barres verticales indiquent les valeurs maximales et minimales mesurées.*

Les pièges à émergence posés sur les différentes parcelles ont permis de recueillir les jeunes adultes de sitones ayant émergé entre, d'une part, le 30 avril et le 18 juin et, d'autre part, entre le 22 juin et le 11 juillet. La **Figure 46** indique que la majorité des jeunes adultes ont émergé sur le pois d'hiver au cours de la période allant du 30 avril au 18 juin (avant la maturité physiologique du pois d'hiver) alors que pour la féverole d'hiver l'émergence des jeunes adultes a eu lieu majoritairement entre le 22/06/2008 et le 11/07/2008.

La comparaison des différents traitements n'a pas permis de mettre en évidence de différence significative entre les traitements de pois d'hiver « pur » et de pois d'hiver en association en raison de la forte variabilité dans les mesures même s'il semblerait que le niveau d'attaque par plante (**Figure 46**) soit légèrement plus élevé dans le cas du pois d'hiver « pur » sans intrant (N0AB*) comparativement aux autres traitements monospécifiques de pois d'hiver. De même, les associations ICPlin-AcN35P1 et ICPmix-NdN35P1 semblent présenter un niveau d'attaque par plante supérieur à celui des autres associations avec du pois d'hiver. Par contre on observe que le nombre d'individus ayant émergé sur la féverole d'hiver « pure » est supérieur à ceux ayant émergé sur l'association blé dur – féverole d'hiver N0AB* et sur le pois d'hiver « pur » ou associé. Par ailleurs, le nombre d'adultes a été significativement réduit dans l'association blé dur – féverole d'hiver N0P1 comparativement aux association N0AB* et N0P3.

Lorsque l'on intègre la densité de plantes pour estimer le nombre total de sitones par mètre carré (**Figure 46**) on remarque que le pois d'hiver sans intrant est la culture de pois d'hiver où la population de sitones est la plus élevée. Viennent ensuite les associations ICPlin-AcN35P1, ICPmix-NdN35P1 et ICPadd-NdN0P1 qui semblent présenter des populations légèrement supérieures aux cultures « pures » de pois d'hiver N0P1 et N0P3 qui, elles mêmes, semblent plus infestées que les associations ICPlin-NdN35P1 et ICPmix-AcN35P1. L'intégration de la densité ne modifie pas les résultats observés sur la féverole d'hiver en raison d'un nombre de plantes relativement proche dans les cultures « pures » à ceci près que l'effet positif de l'association se trouve accru. Par contre, on observe que l'infestation en nombre d'adultes par m^2 est comparable sur le pois d'hiver « pur » N0AB* et sur la féverole d'hiver « pure » N0P1.

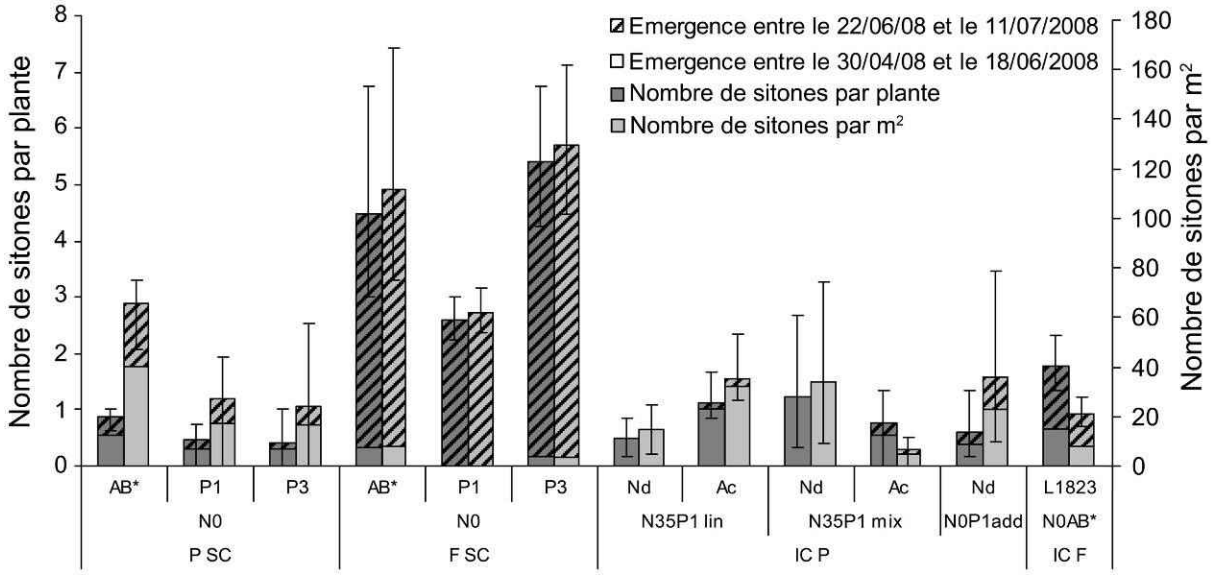


Figure 46 *Nombre de sitones par plante et par mètre carré ayant émergées entre le 30/04/08 et le 18/06/2008 puis entre le 22/06/2008 et le 11/07/2008 dans les cultures « pures » de pois d'hiver (P SC), de féverole d'hiver (F SC) et les associations avec le blé dur (IC P et IC F). Les valeurs sont la moyenne de n=3. Les barres verticales indiquent les valeurs maximales et minimales mesurées sur la période allant du 30/04/2008 au 11/07/2008.*

V.2.2. Cas des pucerons du pois d'hiver et de la féverole d'hiver

La **Figure 47** représente le nombre de pucerons du pois d'hiver et de la féverole d'hiver mesurés en considérant la moyenne des comptages effectués les 15 avril 2008 et 19 mai 2008 exprimées en pucerons par plante ou pucerons par mètre carré. On observe que les niveaux de population sont relativement bas avec en moyenne moins d'un individu par plante et un maximum observé à 7 individus par plante (P SC N0P1). On remarque par ailleurs, une forte variabilité dans les mesures, en particulier dans le cas des cultures « pures » de pois d'hiver qui semblent présenter des niveaux de population supérieurs aux associations blé dur – pois d'hiver et ce aussi bien d'un point de vue du nombre de pucerons par plante que par mètre carré. En outre, la moyenne tend à indiquer que le nombre d'individus est supérieur dans le cas de la culture « pure » de pois d'hiver N0P1 mais la variabilité est telle que la différence n'est pas significative. Enfin, aucune différence n'a été observée entre les différentes associations aussi bien par plante que par mètre carré. Dans le cas de la féverole d'hiver, aucun puceron n'a été observé dans les associations et les cultures « pures » à l'exception de quelques individus isolés dans le cas de la culture « pure » N0P1.

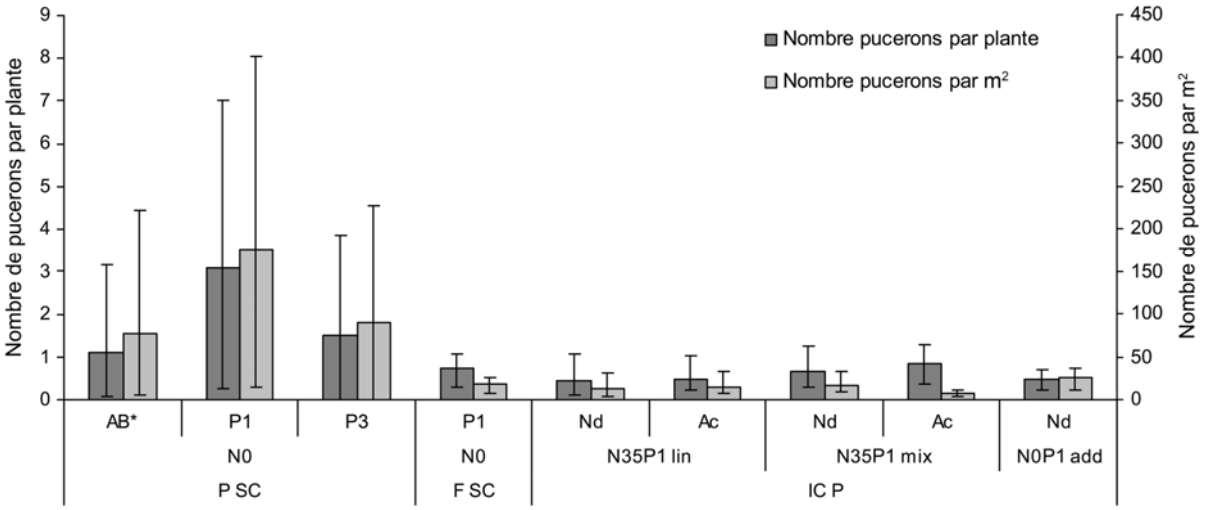


Figure 47 *Nombre de pucerons verts par plante et par m^2 en considérant la moyenne des comptages effectués le 15/04/2008 et le 19/05/2008 dans les cultures « pures » de pois d'hiver (P SC) et de féverole d'hiver (F SC) et les associations avec le blé dur (IC P et IC F). Les valeurs sont la moyenne de n=6. Les barres verticales indiquent les valeurs maximales et minimales observées lors des deux comptages.*

V.3 Cas des adventices

On a observé une infestation importante de toute la parcelle d'essai, avec des différences en termes d'espèces et de biomasse (**Figure 48**). Les matricaires, la folle avoine et les chardons ont été les espèces prédominantes et on observe une infestation maximale (pour ces trois espèces confondues) sur le bloc 3 (0.8 t d'adventices ha^{-1}) et minimale sur le bloc 2 (0.5 t d'adventices ha^{-1}).

On observe, dans le cas de la culture « pure » de pois d'hiver, qu'il n'y a pas de différence significative entre les différents itinéraires techniques et ceci en raison de la très forte variabilité observée dans la biomasse totale des adventices due à l'hétérogénéité spatiale. Ces résultats indiquent donc qu'il n'y a pas eu de différence entre les traitements avec désherbage chimique (N0P3 et N0P1) et le traitement N0AB* pour lequel deux désherbages mécaniques à la herse étrille ont été effectués. Par contre, dans le cas de la féverole d'hiver « pure » l'infestation est maximale dans le traitement N0P3 et minimale en N0AB* mais là encore avec une forte variabilité. On notera par ailleurs que la folle avoine est largement majoritaire dans les cultures « pures » de féverole d'hiver.

En ce qui concerne les cultures « pures » de blé dur, on remarque que l'infestation est supérieure dans le cas des semis tardifs (AcN75P2 et AcN35P1) et de L1823 sans désherbage chimique (N0AB*) comparativement aux semis précoces (NdN75P2 et NdN35P1) et il n'y a pas eu de différence entre les traitements N75P2 et N35P1. Enfin, nous observons que la quantité d'adventices est inférieure dans les cultures « pures » de blé dur comparativement aux cultures « pures » de pois d'hiver.

Dans le cas des associations blé dur – pois d'hiver, des résultats similaires ont été observés, à savoir que les populations d'adventices ont été supérieures lors des semis tardifs et ce aussi bien dans le cas des associations en ligne que des associations en mélange sur le rang. Aucune différence significative n'a été observée entre les mélanges en ligne et ceux en « vrac ». Par contre, la biomasse des adventices semble légèrement supérieure dans le cas du mélange additif comparativement aux mélanges semés à la même date. L'association blé dur – féverole d'hiver N0AB* présente quant à elle un niveau d'infestation par les adventices

légèrement supérieur à celui des associations blé dur – pois d'hiver en ligne mais inférieur aux autres associations avec du pois d'hiver.

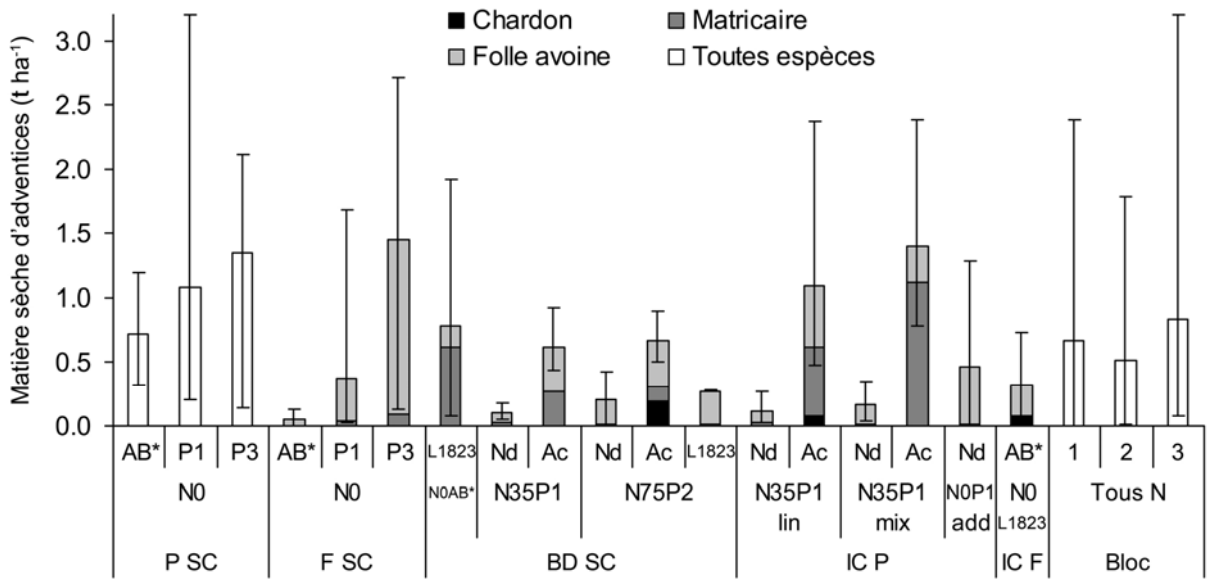


Figure 48 *Quantité de mauvaises herbes (t ha^{-1}) – chardon, folle avoine et matricaire – dans les cultures « pures » de pois d'hiver (P SC), de féverole d'hiver (F SC), de blé dur (BD SC) et les associations blé dur – pois d'hiver (IC P) et blé dur – féverole d'hiver (IC F) pour les différents traitements ainsi qu'en moyenne pour les blocs 1, 2 et 3. Les valeurs sont la moyenne de n=3 à 6 (n=15 pour les moyennes par bloc). Les barres verticales indiquent les valeurs maximales et minimales mesurées. Dans le cas des cultures « pures » de pois d'hiver les espèces n'ont pas été identifiées.*

La quantité d'adventices dans les associations blé dur – pois d'hiver est donc inférieure à celle dans les cultures « pures » de pois d'hiver à l'exception des mélanges semés tardivement. A contrario, les associations blé dur – pois d'hiver présentent des niveaux d'infestation supérieurs aux cultures « pures » de blé dur dans le cas des semis tardifs, alors que dans le cas des semis précoce, la biomasse des adventices dans les associations n'est pas significativement différente de celle dans les cultures monospécifiques de blé dur, à l'exception toutefois de l'association additive (ICPadd-NdN0P1) avec une densité double de pois d'hiver. En ce qui concerne l'association blé dur – féverole d'hiver sans intrant (N0AB*) elle présente un niveau d'infestation inférieur au blé dur L1823N0AB* mais supérieur à la féverole d'hiver « pure » N0AB*.

VI. Evaluation économique des prototypes d'itinéraires techniques de cultures en association

VI.1 Marges directes obtenues dans l'expérimentation 2007-2008

Les marges directes (MD) calculées pour les différents itinéraires techniques (**Figure 49**) montrent des variations allant de 971 € ha^{-1} pour la féverole d'hiver « pure » sans intrant (N0AB*) à 62 € ha^{-1} pour l'association en mélange sur le rang semée tardivement.

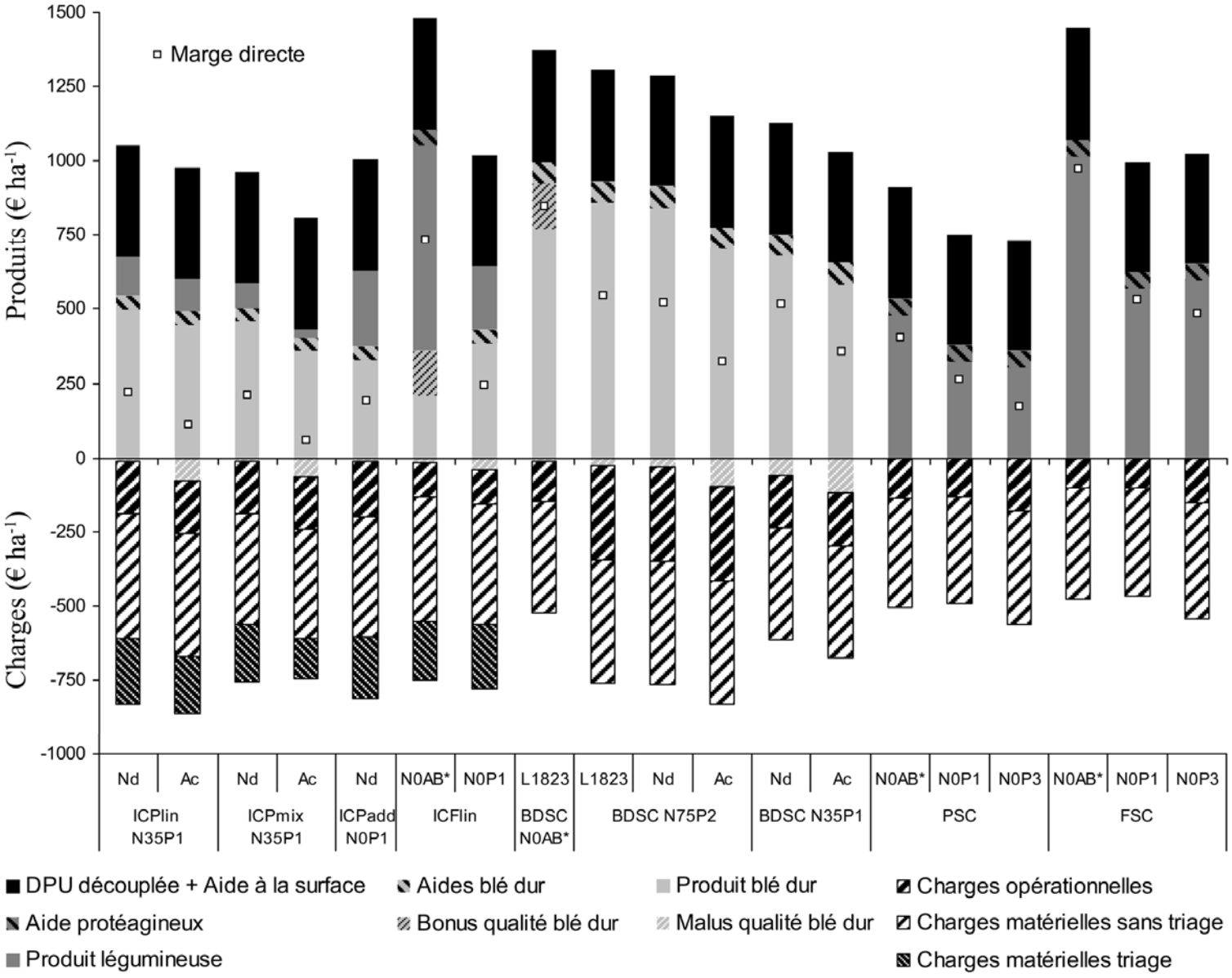


Figure 49 *Charges, produits et marge directe (€ ha^{-1}) en considérant les différents postes que sont les aides (DPU, aide à la surface, aides blé dur et protéagineux), les produits bruts de la vente des cultures, les bonus et malus liés à la qualité du blé dur et enfin les charges opérationnelles et matérielles qui incluent le coût de traction et de main d'œuvre pour les différents itinéraires techniques.*

On remarque que les légumineuses « pures » N0P3 présentent des bilans économiques moindres que les même cultures en N0P1 elles mêmes moins performantes que celles sans intrant vendues en AB (N0AB*) avec respectivement 172, 262 et 405 € ha^{-1} pour le pois d'hiver et 485, 529 et 971 € ha^{-1} pour la féverole d'hiver. Ces différences s'expliquent par des charges plus importantes en N0P3 (552 € ha^{-1}) par rapport à N0P1 (480 € ha^{-1}) et par une meilleure valorisation des protéagineux en agriculture biologique.

Concernant les cultures « pures » de blé dur, c'est celle sans intrant (N0AB*) qui présente la meilleure marge directe avec 848 € ha^{-1} toujours du fait d'une meilleure valorisation de la production en agriculture biologique. Le blé dur Acalou semé tardivement est celui dont la marge directe en culture « pure » est la plus faible avec 339 € ha^{-1} en moyenne pour N35P1 et N75P2 du fait d'une moindre production par rapport au blé dur Neodur dont les marges directes ont été en moyenne pour N35P1 et N75P2 de 518 € ha^{-1}. Notons qu'il n'y a pas de différence significative entre les traitements N35P1 et N75P2 ce qui s'explique par le fait que la moindre production en N35P1 est compensée par des niveaux de charges très inférieurs aux traitements N75P2 (555 et 735 € ha^{-1} respectivement).

L'association blé dur – féverole d'hiver sans intrant (N0AB*) est celle qui présente la meilleure marge directe (731 € ha^{-1} qui est très largement supérieure à l'association blé dur – féverole d'hiver N0P1 (242 € ha^{-1}). On notera que les associations avec Neodur sont toujours plus performantes que celles semées tardivement avec Acalou (215 et 86 € ha^{-1} respectivement en moyenne pour les associations ligne et « vrac »). Enfin, dans le cas des associations avec Neodur, on observe des résultats économiques relativement proches entre les associations en ligne, en mélange sur le rang et additive avec respectivement 220, 209 et 191 € ha^{-1}. Il est important de remarquer que le tri des graines dans les associations représente le principal poste de dépense avec 26% des charges totales (charges opérationnelles et matérielles confondues).

VI.2 Marges directes et assolement

Les Land Equivalent Ratio ont été calculés sur la base des marges directes (LER_{MD}) en comparant tout d'abord 1 ha d'association avec 1 ha de blé dur ($LER_{MD\text{-}BD}$) ce qui revient à considérer que l'association remplacerait dans les assolements uniquement le blé dur. Par analogie, nous avons comparé la marge directe de l'association avec celle de la légumineuse ($LER_{MD\text{-}Leg}$). Par ailleurs, l'introduction des associations dans les assolements pourrait se faire en substitution non pas uniquement du blé dur ou de la légumineuse mais des deux cultures. En particulier, si les associations venaient à remplacer totalement les cultures « pures » de blé dur et de légumineuse il faudrait comparer la performance économique des associations avec celle des cultures « pures » en tenant compte de leur part dans les assolements.

Par conséquent nous avons choisi de comparer plusieurs scénarios en comparant la marge directe de 2 ha d'association avec 1 ha de blé dur et 1 ha de légumineuse ($LER_{MD\text{-}1:1}$) ou en considérant que 3 ha d'association se substitueraient à 2 ha de blé dur et 1 ha de légumineuse ($LER_{MD\text{-}2:1}$) ou à 1 ha de blé dur et 2 ha de légumineuse ($LER_{MD\text{-}1:2}$) et enfin que 4 ha d'association viendraient remplacer 1 ha de blé dur et 3 ha de légumineuse ($LER_{MD\text{-}1:3}$) ou 3 ha de blé dur et 1 ha de légumineuse ($LER_{MD\text{-}3:1}$).

Les différents Lands Equivalent Ratio calculés à partir des marges directes sont toujours significativement inférieurs à 1 et ce quelle que soit l'association (**Tableau 22**). En moyenne 0.25 ha de blé dur et 0.25 ha de légumineuse d'hiver en cultures monospécifiques réalisent la même marge directe que 1 ha d'association et ceci en considérant que l'on remplacerait une surface identique de blé dur et de légumineuse d'hiver par des associations. Par ailleurs, plus on accorde un poids important au blé dur ($LER_{MD\text{-}2:1}$ et $LER_{MD\text{-}3:1}$) plus le désavantage économique des associations apparaît et inversement lorsque l'on compare les associations

avec une quantité de légumineuse d'hiver plus importante ($LER_{MD-1:2}$ et $LER_{MD-1:3}$). Ce résultat traduit simplement l'importance économique plus forte du blé dur comparativement aux légumineuses d'hiver comme le montrent les valeurs de LER_{MD-BD} significativement supérieures à celles des LER_{MD-Leg} (0.43 et 0.61 en moyenne respectivement) sauf dans le cas de l'association blé dur – féverole d'hiver N0AB* où le résultat est contraire. Par ailleurs ce calcul revient à évaluer, d'un point de vue économique seulement, l'effet de remplacer les couverts monospécifiques par des associations, et ceci en considérant que l'on remplace une proportion plus ou moins importante de chacune des deux espèces.

				Blé dur - Pois					Blé dur - Féverole	
				Neodur			Acalou		L1823	
				N35P1		N0P1	N35P1		ICFlin	
				ICPlin	ICPmix	ICPadd	ICPlin	ICPmix	N0AB*	N0P1
Marge directe des associations (€ ha-1)				220	209	191	111	62	731	242
LER	MD association	÷	MD Blé dur	= LER_{MD-BD}	0.43	0.41	0.37	0.31	0.17	0.86	0.44
			MD Légumineuse	= LER_{MD-Leg}	0.84	0.80	0.73	0.42	0.24	0.75	0.46
	2 * MD association	÷	(MD Blé dur + MD Légumineuse)	= $LER_{MD-1:1}$	0.57	0.54	0.49	0.36	0.20	0.80	0.45
	3 * MD association	÷	(2 x MD Blé dur + MD Légumineuse)	= $LER_{MD-2:1}$	0.51	0.49	0.44	0.34	0.19	0.82	0.45
			(MD Blé dur + 2 x MD Légumineuse)	= $LER_{MD-1:2}$	0.64	0.60	0.55	0.38	0.21	0.79	0.45
	4 * MD association	÷	(3 x MD Blé dur + MD Légumineuse)	= $LER_{MD-3:1}$	0.49	0.46	0.42	0.33	0.19	0.83	0.45
			(MD Blé dur + 3 x MD Légumineuse)	= $LER_{MD-1:3}$	0.68	0.64	0.59	0.39	0.22	0.78	0.45

Tableau 22 *Land equivalent ratio calculés à partir des marges directes (€ ha^{-1}) pour les différentes associations en comparant : i) 1 ha d'association avec 1 ha de blé dur (LER_{MD-BD}) ou avec 1 ha de légumineuse (LER_{MD-Leg}), ii) 2 ha d'association avec 1 ha de blé dur et 1 ha de légumineuse ($LER_{MD-1:1}$), iii) 3 ha d'association avec 2 ha de blé dur et 1 ha de légumineuse ($LER_{MD-2:1}$) ou avec 1 ha de blé dur et 2 ha de légumineuse ($LER_{MD-1:2}$) et iv) 4 ha d'association avec 3 ha de blé dur et 1 ha de légumineuse ($LER_{MD-3:1}$) ou avec 1 ha de blé dur et 3 ha de légumineuse ($LER_{MD-1:3}$). Dans le cas de l'association blé dur – féverole d'hiver N0P1 la référence blé dur est le traitement N75P2. Une valeur de LER supérieure à 1 indique que l'association est plus efficace que les cultures pures (selon le ratio de surface blé dur/pois considéré) du point de vue de la marge directe et vice versa (voir* ***Chapitre II, Partie V*** *pour plus de détails).*

Si l'on compare maintenant les différentes associations, on retrouve les résultats précédemment décrits, à savoir que l'association en mélange sur le rang semée tardivement est la moins performante puisqu'il suffit dans ce cas de 0.20 ha de cultures « pures » pour réaliser la marge directe d'un hectare de cette association. A l'opposé il faudrait en moyenne 0.80 ha de cultures monospécifiques pour réaliser la marge directe de l'association blé dur – féverole d'hiver N0AB*.

VII. Discussion sur la performance des itinéraires techniques association conçus à dire « d'experts » et perspectives

VII.1 Les associations et l'amélioration qualitative du blé dur

L'objectif premier des itinéraires techniques testés était d'obtenir du blé dur de qualité technologique satisfaisante tout en réduisant les apports d'intrants et en maintenant un certain niveau de production de la céréale. Les résultats de cette campagne ont permis de confirmer le fait que les associations blé dur – pois d'hiver et blé dur – féverole d'hiver permettent d'accroître la teneur en protéines du blé dur comparativement aux cultures « pures » ayant reçu le même niveau de fertilisation et ceci quels que soient les structures des associations, variétés, dates de semis et densités de peuplement. Au final, il aurait fallu, dans nos

conditions, apporter 40 kg N ha^{-1} de plus aux cultures « pures » de blé dur pour obtenir la même teneur en protéines que dans les associations et même 75 kg N ha^{-1} de plus si l'on compare aux associations blé dur – pois d'hiver additive sans fertilisation azotée et blé dur – féverole d'hiver sans intrant.

Comme nous l'avions mis en évidence préalablement, l'amélioration de la teneur en protéines du blé dur dépend de la production de la céréale dans les associations, à savoir que plus le rendement du blé dur associé est faible plus sa teneur en protéines sera élevée – comme cela a d'ailleurs été démontré par de nombreux auteurs dans le cas des couverts monospécifiques (e.g. Gate 1995). Ainsi, ce sont les associations blé dur – féverole d'hiver sans intrant, blé dur – pois d'hiver additive et l'association semée tardivement en mélange sur le rang qui ont eu les teneurs en protéines les plus élevées. Pour autant, dans le cas de ces trois associations, le faible rendement du blé dur n'a pas la même origine.

Dans le cas de l'association additive, la production de blé dur est fortement réduite par la compétition exercée par le pois d'hiver et ceci en comparaison avec les associations en ligne ou en mélange utilisant le même cultivar de blé dur (Neodur). En effet, dans l'association additive le rendement du pois d'hiver est d'environ 2 t ha^{-1} contre seulement 1.0 et 0.7 t ha^{-1} pour l'association en ligne et en « vrac » respectivement. Notons que l'accroissement de la teneur en protéines des grains du blé dur dans l'association additive est d'autant plus remarquable que celle-ci n'a pas été fertilisée. En effet, comme nous en avions émis l'hypothèse, la densité forte du pois d'hiver a permis une réduction significative du nombre d'épis et de grains de la céréale et donc une augmentation de la quantité d'azote accumulée par grain de blé dur. Par ailleurs, la fixation symbiotique du pois d'hiver en association est supérieure à celle des cultures « pures » – comme nous l'avons mis en évidence lors des expérimentations précédentes et comme cela a également été démontré par de nombreux auteurs (e.g. Corre-Hellou 2005 ; Hauggaard-Nielsen et al. 2003 ; Corre-Hellou et Crozat 2005). Dès lors, en plus de réduire le rendement du blé dur, la légumineuse n'utiliserait qu'une faible quantité d'azote minéral du sol, en particulier en absence de fertilisation azotée, laissant donc cette ressource disponible en quasi totalité pour la céréale.

A contrario, dans le cas de l'association blé dur – pois d'hiver semée tardivement en mélange sur le rang, le moindre rendement du blé dur ne s'explique pas par la production de pois d'hiver qui a été de seulement 0.2 t ha^{-1}. On peut faire l'hypothèse que, dans ce cas, la réduction du rendement du blé dur s'explique par le décalage de la date de semis et/ou un effet variétal. Si l'on compare le rendement du blé dur Neodur avec celui d'Acalou en culture « pure » et en association, on observe qu'Acalou produit en moyenne 85% du rendement de Neodur dans le cas des cultures « pures », 90% dans le cas de l'association en ligne et 78% dans les associations en mélange sur le rang. Par conséquent, les effets date de semis et variété ne permettent pas à eux seuls d'expliquer la moindre production du blé dur Acalou en association en mélange sur le rang. Cela nous amène à formuler une seconde hypothèse, à savoir que la faible production d'Acalou dans cette association provient d'une moindre densité de la céréale (85 plantes m^{-2} contre 138 plantes m^{-2} dans l'association en ligne). Ces résultats indiquent donc que la maîtrise de la densité est un point clé de la réussite des associations, comme cela a été mis en évidence dans le cas des associations blé dur – féverole d'hiver (cf. **Chapitre III : Partie II**).

Enfin, le très faible rendement du blé dur L1823 en association avec la féverole d'hiver sans intrant (N0AB*) peut s'expliquer par la très basse densité du blé dur (59 plantes m^{-2} contre 119 plantes m^{-2} dans le cas de l'association N0P1 ayant eut un traitement de semence) ce qui montre par ailleurs l'importance qu'a eu le traitement de semence sur L1823 dans cet essai. La compétition exercée par la féverole d'hiver sur le blé dur a semble t-il également été un élément majeur. En effet, alors que la densité du blé dur est identique dans l'association N0P1 et dans le blé dur « pur » N0AB* (119 et 125 plantes m^{-2}) leur rendement respectif a été

de 2.7 et 4.1 t ha^{-1} ce qui indiquerait que les compétitions interspécifiques de la féverole d'hiver sur le blé dur ont engendré une diminution du rendement du blé dur de l'ordre de 1.4 t ha^{-1}.

VII.2 Les associations et l'amélioration quantitative de la production

Si l'association permet bien d'améliorer la teneur en protéines du blé dur, il était aussi nécessaire de vérifier que ce gain qualitatif ne se faisait pas uniquement au détriment de la production quantitative globale de l'association comparativement aux cultures monospécifiques.

Le Land Equivalent Ratio – un indicateur pertinent pour évaluer la performance des associations comparativement aux cultures « pures » – traduit l'utilisation des ressources du milieu (lumière, CO_2, eau, nutriments dont l'azote) tout au long du cycle cultural pour la production de biomasse et du rendement. Nous avons ainsi montré que les associations blé dur – pois d'hiver semées en ligne permettaient d'améliorer le rendement global de l'ordre de 13% comparativement aux cultures « pures » de pois d'hiver non fertilisées et aux cultures « pures » de blé dur ayant reçu le même apport d'engrais azoté. Notons que l'association additive a quant à elle permis, sans apport d'azote, d'améliorer le rendement relatif de 29% alors même que la référence considérée pour la céréale était le blé dur fertilisé avec 35 kg N ha^{-1}. Par contre, les semis en « vrac » n'ont pas permis – comme on l'espérait – d'améliorer la production relative comparativement aux couverts monospécifiques, comme l'indiquent les valeurs de LER inférieures à 1 (0.70 et 0.94 respectivement pour Acalou et Neodur). Cela a également été le cas des associations de L1823 avec la féverole d'hiver qui ont eu une performance comparable à celle des cultures « pures ». Ces résultats confirment donc l'importance de la structure du couvert et notamment l'agencement des plantes dans l'espace ainsi que celle du choix des espèces à associer et de leurs densités.

A l'exception de l'association additive blé dur – pois d'hiver et du mélange blé dur – féverole d'hiver sans intrant où la légumineuse a réduit la production du blé dur par plante et par rang, on observe que c'est le blé dur qui a le plus bénéficié de l'association et cela au détriment de la légumineuse. En effet, à l'exception de ces deux associations, le blé dur associé a eu un rendement en moyenne de 69% de celui des blés durs « purs » alors que le pois d'hiver associé n'a produit en moyenne que 28% du rendement du pois d'hiver cultivé seul et 36% dans le cas de la féverole d'hiver. Par conséquent, dans cette expérimentation de test de prototypes d'itinéraires techniques, on observe une corrélation positive entre le LER partiel du pois d'hiver et le LER total. Cela indique que l'efficacité de l'association blé dur – pois d'hiver du point de vue du rendement global dépend de la production de la légumineuse dans l'association ce qui explique que l'association additive soit la plus performante.

Inversement, ce sont les associations blé dur – pois d'hiver en mélange sur le rang qui sont les moins performantes en raison d'une réduction de la production de pois d'hiver comparativement aux associations en ligne. Dans le cas du semis tardif, cela s'explique – comme nous l'avons signalé précédemment – par une faible densité de pois d'hiver dans le mélange en « vrac ». Par contre, dans le cas du semis précoce avec Neodur, les densités du pois d'hiver en association ligne et « vrac » sont sensiblement les mêmes (30 et 28 plantes m^{-2} respectivement) et il n'y pas non plus de différence importante quant à la densité du blé dur (109 et 95 plantes m^{-2} respectivement). Par conséquent, l'écart entre ces deux types d'association ne peut s'expliquer que par un effet de la structure du couvert, à savoir que – comme nous en avions fait l'hypothèse – à densité équivalente l'association en mélange sur le rang est moins favorable au pois d'hiver que ne l'est l'association en ligne et

inversement pour le blé dur. Ceci est à mettre en relation avec la croissance plus tardive du pois d'hiver et par le fait que dans les associations en ligne chaque espèce dispose en début de croissance d'un espace qui lui est propre au sein du rang et de l'inter-rang. A contrario, dans les mélanges sur le rang les deux espèces sont, dès le début de leur croissance, en concurrence directe pour les ressources du milieu et en particulier pour la lumière. Par conséquent, la quantité de lumière disponible pour le pois d'hiver doit être moindre dans les mélanges sur le rang comparativement aux mélanges en ligne ce qui de fait pénalise la croissance de la légumineuse.

Lorsque l'on considère la quantité d'azote accumulée dans les parties aériennes, on observe que les valeurs des LER_N sont en moyenne identiques à celles des LER_Y (1.04 et 1.02 en moyenne) alors qu'en considérant uniquement l'azote accumulé dans les grains, les LER_N auraient été légèrement supérieurs à ceux calculés sur le rendement (1.09 et 1.02 en moyenne). Cela indique que l'avantage de l'association est supérieur pour l'azote accumulé dans les grains que pour le rendement – ce qui confirme que l'association dépend fortement de la complémentarité entre les espèces pour l'utilisation des deux sources d'azote que sont l'azote de l'air et l'azote minéral du sol, et ceci tout particulièrement dans les systèmes à faible disponibilité en azote. Ces résultats indiquent surtout que l'efficacité de l'association comparativement aux cultures « pures » est supérieure du point de vue de la production de grains que du point de vue de la biomasse en situation de faible disponibilité en azote. En d'autres termes, cela signifie que les associations permettent d'augmenter les indices de récolte comparativement aux cultures « pures » ce qui est tout particulièrement vrai pour le pois d'hiver dont l'indice de récolte moyen en culture « pure » était de seulement 0.33 contre 0.51 dans les associations. Par contre les indices de récolte de la féverole d'hiver et du blé dur ont été comparables en association et en culture « pure » (0.50 et 0.47 respectivement pour la féverole d'hiver ; 0.46 et 0.48 respectivement pour le blé dur).

VII.3 Effet des associations sur le reliquat azoté à la récolte

Le reliquat azoté à la récolte a été logiquement supérieur dans le cas des cultures « pures » de légumineuses en raison de leur nutrition azotée qui dépend de l'azote minéral du sol à hauteur de seulement de 40%. Le reliquat azoté qui semble légèrement supérieur dans les cultures « pures » de blé dur N75P2 comparativement aux cultures « pures » N35P1 n'est toutefois pas significativement différent indiquant que les 40 kg N ha^{-1} supplémentaires apportés au stade épi 1 cm du blé dur ont été correctement valorisés. De même, il n'y a pas de différence significative entre les reliquats des différentes cultures associées ayant reçu 35 kg N ha^{-1} du fait d'une quantité d'azote accumulée par le blé dur relativement similaires entre ces différents mélanges.

Par contre, nous n'avons pas observé un reliquat moindre dans le cas de l'association additive blé dur – pois d'hiver et de l'association blé dur – féverole d'hiver n'ayant pas reçu de fertilisation azotée. Pourtant les quantités d'azote minéral du sol accumulées par ces associations sont relativement proches de celles des associations N35P1 et donc on s'attendrait à observer un reliquat moindre d'environ une trentaine de kg N ha^{-1} d'après le bilan d'azote. Ce résultat est à relier à la forte variabilité spatiale de l'azote minéral du sol en lien avec l'histoire culturale de la parcelle ayant reçu des apports de fumiers dont la répartition n'a certainement pas été faite de façon homogène. Dès lors, la forte variabilité observée sur le reliquat azoté à la fois au semis et à la récolte rend les analyses du bilan azoté peu puissantes et sensibles. Toutefois, ces résultats confirment le fait que les associations permettent de réduire le reliquat azoté à la récolte comparativement aux cultures « pures » de légumineuses mais non par rapport aux cultures monospécifiques de blé dur.

VII.4 Les associations et la lutte contre les bio-agresseurs

VII.4.1. Associations et maladies foliaires du blé dur

La septoriose (*S tritici* et *S. nodorum*) – maladie majoritaire du blé dur sur cet essai – s'est développée à partir du 7 mai, soit une semaine avant la floraison de la céréale et ce indépendamment de la date de semis, de la présence ou non de protection fongicide et de la culture (blé dur « pur », association blé dur – pois d'hiver ou association blé dur – féverole d'hiver). Pour autant, les semis tardifs du blé dur Acalou semblent avoir été plus affectés que les semis précoces avec Neodur ce qui peut être la conséquence aussi bien du décalage de la date de semis que d'un effet variétal. Cette dernière hypothèse semble toutefois négligeable en raison d'une sensibilité similaire des variétés Neodur et Acalou à la septoriose d'après les résultats obtenues par le GEVES dans le cadre de l'expérimentation CTPS (Source : Les variétés de céréales du catalogue officiel français – n°4 2005). En effet, Acalou est considéré comme assez sensible et Neodur comme assez sensible à peu sensible. Toutefois, en raison des interactions génotype-environnement et des différences entre nos essais et les essais CTPS nous ne pouvons pas complètement exclure ce facteur.

On a par ailleurs observé que les traitements fongicides réalisés les 9 avril et 13 mai sur les cultures « pures » N75P2 ont permis de limiter significativement le développement de la septoriose mais uniquement dans le cas de Neodur. Toutefois, ceci est à nuancer par le fait que la culture « pure » d'Acalou N75P2 avait une biomasse de 9.7 t ha^{-1} contre 7.2 t ha^{-1} en N35P1 ce qui semble indiquer un effet des traitements fongicides. Pour autant on peut émettre l'hypothèse que le niveau d'inoculum était trop important dans le cas du semis tardif – et donc n'a pu être limité significativement par les traitements fongicides – à la différence des semis précoces pour lesquels la quantité d'inoculum était probablement plus faible.

L'effet date de semis semble donc l'hypothèse à privilégier pour expliquer la différence entre les variétés Acalou et Neodur. Le décalage de semis d'Acalou s'est traduit par une moindre biomasse est un moindre développement foliaire (une a deux feuilles de moins que Neodur). On s'attendrait donc – ce qui n'a pas été le cas – à ce que le niveau de maladie soit moindre dans le cas du semis tardif (Acalou). Nous pouvons donc penser que le développement plus important de la septoriose sur Acalou semé tardivement pourrait être la conséquence d'une différence de hauteur entre les deux cultivars, Acalou étant effectivement significativement plus petit que Neodur (respectivement 81 cm et 98 cm). Par conséquent la septoriose aurait pu se développer et atteindre – par effet « splashing » (e.g. Wale et Colhoun 1979) – plus facilement les deniers étages foliaires sur lesquels ont été fait les notations.

Le blé dur L1823 présentait quant à lui en N75P2 un niveau de maladie identique au blé dur Acalou semé tardivement et supérieur au blé dur Neodur semé à la même date. Ce résultat semble indiquer une sensibilité de L1823 plus importante à la septoriose, ce qui est d'autant plus remarquable que la lignée L1823 présente une hauteur de paille significativement plus élevée (113 cm à la floraison contre 98 cm pour Neodur et 81 cm pour Acalou). Par ailleurs, en l'absence de traitement phytosanitaire (N0AB*) le niveau de septoriose sur L1823 cultivé « pur » a été fortement réduit par rapport au traitement N75P2 ce qui s'explique très certainement par une moindre biomasse en absence d'intrant (9.3 t ha^{-1} contre 13.5 t ha^{-1} en N75P2) en lien avec la très faible densité du blé dur en N0AB*.

Des résultats similaires ont été obtenus dans les associations lorsque l'on compare – pour un même type d'association – les cultivars Acalou et Neodur, à savoir que les associations avec Acalou ont été plus infestées que celles avec Neodur. Par ailleurs, si les associations ont globalement permis de réduire la pression de la septoriose par rapport aux

cultures « pures » ayant reçu la même fertilisation azotée (35 kg N ha^{-1}), cela n'a pas été le cas de l'association en « vrac » semée tardivement avec Acalou. On peut émettre l'hypothèse que la faible production de blé dur dans cette association – liée à une moindre densité de plantes – a permis à la maladie de se propager plus rapidement dans ce couvert par effet « splashing » de par une meilleure pénétration de l'eau et du vent dans le couvert (Wale et Colhoun 1979 ; Brennan et al. 1985). Cette dernière hypothèse est néanmoins contradictoire avec les résultats observés sur le blé dur L1823 en culture « pure » pour qui l'infestation augmentait avec la quantité de biomasse produite. Il se pourrait donc que la différence entre ces deux variétés s'explique par des interactions entre hauteur, densité, date de semis et structure des couverts sans pour autant exclure un biais dans notre analyse. Quoiqu'il en soit l'évaluation des associations vis-à-vis des maladies mériterait un travail spécifique et approfondi afin de vérifier les différentes hypothèses énoncées.

L'effet positif des associations sur la réduction de la septoriose comparativement aux cultures « pures » de blé dur pourrait s'expliquer par un effet de barrière « physique » de la légumineuse sur la propagation de la maladie du fait que le pois d'hiver n'est pas sensible à la septoriose (Rämert et al. 2002). En effet, lorsque les spores atterrissent sur la plante non hôte cela ne permet pas la dispersion de la maladie ou tout du moins cela réduit sa vitesse de propagation (**Figure 50**). Cela serait tout particulièrement le cas des maladies fongiques se propageant des organes inférieurs vers les organes supérieurs par les éclaboussures d'eau de pluie et par le vent (Bannon et Cooke 1998).

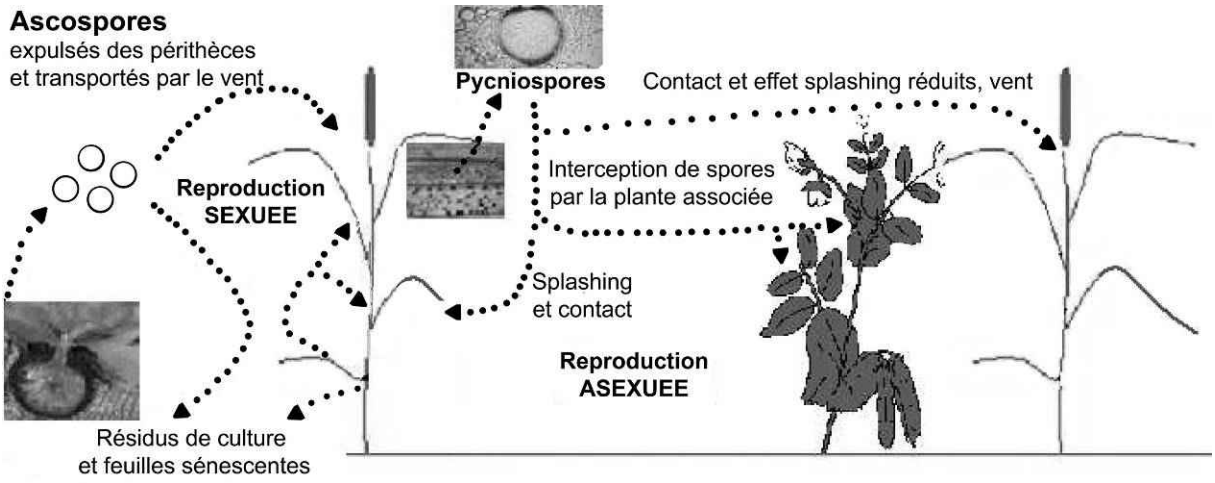


Figure 50 *Effet de la culture associée sur la dissémination des spores de Septoria tritici ou de Mycosphaerella pinodes. D'après le Groupe Pilote Fongicides Durable et Réseau Opticoop 2003, Walklate 1989 et Tompkins et al. 1993.*

Cette hypothèse est cohérente avec le fait qu'il semble que plus la biomasse de la légumineuse dans l'association est importante plus le niveau d'infestation de la maladie sur le blé dur est faible. Néanmoins, nous ne pouvons pas exclure que la différence observée entre les associations en ligne et en « vrac » s'explique également par la structure du couvert à savoir qu'à densité et biomasse égales la propagation de la maladie entre les rangs de blé dur dans les associations en ligne serait diminuée par la présence d'un rang de pois d'hiver intercalé. A l'inverse il existe, dans les mélanges intimes, une continuité entre les plantes de blé dur ce qui limiterait l'effet du pois d'hiver sur la propagation de la septoriose. Par ailleurs, l'effet positif des associations blé dur – pois d'hiver sur le développement de cette maladie pourrait s'expliquer par une moindre circulation de l'air et de la vapeur d'eau (modification de l'humidité du couvert) dans ces couverts comparativement aux couverts monospécifiques de blé dur. En effet, la liaison du pois d'hiver au blé dur via ses vrilles foliaires dans les associations forme un couvert structuré dans lequel l'air circulerait moins bien que dans des

cultures « pures » de blé dur réduisant ainsi la propagation de la maladie. Notons qu'il ne s'agit là que d'hypothèses et qu'il serait nécessaire d'étudier plus précisément la propagation des maladies dans les couverts afin de les vérifier formellement. Enfin, dans le cas de l'association de L1823 avec la féverole d'hiver sans intrant le moindre développement de la septoriose sur le blé dur comparativement à la culture « pure » s'expliquerait d'abord par la très faible biomasse du blé dur (2.9 t ha^{-1}) même si la encore il est possible que les rangs de féverole d'hiver aient joué un rôle de barrière physique.

VII.4.2. Associations et maladies foliaires du pois d'hiver et de la féverole d'hiver

Lors de cette expérimentation, l'anthracnose a été la maladie majoritaire du pois d'hiver et de la féverole d'hiver dont le développement – à la différence de la septoriose du blé dur – s'est fait de manière décalé pour les deux dates de semis mais toujours tardivement ce qui cohérent avec le fait qu'il s'agit là d'une maladie de fin de cycle. L'anthracnose a ainsi commencé à se développer à partir du 15 avril dans le cas des semis précoces et à partir du 6 mai dans le cas des associations blé dur – pois d'hiver semées tardivement et des associations blé dur – féverole d'hiver. Par ailleurs, le développement de l'anthracnose sur le pois d'hiver a été moindre dans le cas des semis tardifs et ce aussi bien pour les associations en ligne qu'en mélange sur le rang. Or, la quantité de biomasse du pois d'hiver dans les associations ligne et « vrac » avec Acalou est très différente de celle avec Neodur. Cela semble indiquer que le niveau de production du pois d'hiver n'a pas eu d'effet, dans notre situation, sur le développement de cette maladie. Par contre, la biomasse totale des associations avec Neodur est supérieure à celle des associations avec Acalou, ce qui aurait pu se traduire par un microclimat plus humide favorisant le développement de la maladie (Roger et Tivoli 1996 ; Roger et al. 1998). Le développement plus tardif de l'anthracnose sur féverole d'hiver pourrait également s'expliquer par : i) des différences de stade physiologique comparativement au pois d'hiver semé précocement, ii) une moindre sensibilité de la féverole d'hiver ou iii) une croissance en hauteur de la féverole d'hiver plus rapide qui aurait retardé le développement de l'anthracnose des organes inférieurs aux organes supérieurs (Bannon et Cooke 1998).

Nous avons par ailleurs montré que le niveau d'anthracnose sur pois d'hiver était légèrement supérieur dans le cas des associations en mélange sur le rang par rapport aux mélanges en ligne alors que la biomasse du pois d'hiver et de l'association est supérieure dans le cas des mélanges en ligne. Cela semble confirmer que cette maladie se développe indépendamment de la biomasse du couvert et ceci que l'on considère la biomasse totale de l'association ou seulement celle de la légumineuse. Dès lors, la différence de pression d'anthracnose entre les associations blé dur – pois d'hiver en ligne et en « vrac » s'expliquerait avant tout par la structure des couverts. Comme dans le cas de la septoriose du blé dur, le rang de blé dur intercalé entre les rangs de pois d'hiver dans les associations en ligne limiterait la propagation de l'anthracnose entre les rangs successifs de pois d'hiver (effet barrière physique ; **Figure 50**). Cela ne serait pas le cas des mélanges plus intimes du fait de la possible continuité entre plantes de pois d'hiver sauf dans le cas de l'association en « vrac » semée tardivement ou la densité de pois d'hiver est très faible. Si en première analyse la biomasse de la légumineuse ne semble pas être un facteur prédominant dans le développement de l'anthracnose nous avons néanmoins observé que la pression de cette maladie était maximale dans le cas de l'association additive, à savoir lorsque la biomasse de la légumineuse a été la plus forte. On peut donc émettre l'hypothèse que la biomasse de la légumineuse ne joue un rôle sur le développement de la maladie qu'au-delà d'un certain niveau de production. Enfin, dans le cas de l'association de L1823 avec la féverole d'hiver, le niveau d'anthracnose sur féverole d'hiver n'a pas été réduit comparativement aux cultures

« pures » ce qui peut s'expliquer par l'absence d'effet « barrière » du blé dur du fait de sa faible biomasse dans ce mélange.

En résumé et comme attendu, les associations blé dur – légumineuse permettent de réduire significativement les symptômes de l'anthracnose sur feuille de pois d'hiver comparativement aux cultures « pures » et ceci quels que soient les dates de semis, cultivars de blé dur associés ou structures du couvert, si toutefois la biomasse du pois d'hiver n'est pas trop importante (cas de l'association additive) ou si la biomasse du blé dur n'est pas trop limitée (association blé dur – féverole d'hiver sans intrant).

Enfin, il est intéressant de constater que dans le cas des cultures « pures » de pois d'hiver nous n'avons pas observé de différence entre les situations sans intrant (N0AB*), avec uniquement un traitement de semence (N0P1) ou avec un traitement de semence et un apport de fongicide le 13 mai (N0P3) alors que le traitement N0P3 semble avoir eu un effet sur le développement de l'anthracnose sur féverole d'hiver. Il est probable que le traitement fongicide ait été réalisé trop tardivement sur le pois d'hiver. En effet, il a été effectué alors que 37% de la surface foliaire du pois d'hiver était déjà atteinte par la maladie ce qui n'aurait donc pas permis d'enrailler son développement. A l'inverse, les symptômes sur féverole d'hiver n'étaient que de 20% lors du traitement fongicide ce qui aurait permis de ralentir le développement de la maladie.

VII.4.3. Associations et sitones du pois d'hiver et de la féverole d'hiver

Nous avons observé dans les cultures « pures » de pois d'hiver et de féverole d'hiver que le pourcentage de nodosités percées était réduit avec l'application d'un traitement insecticide en végétation appliqué le 19 mars (N0P3). Cela semble indiquer que malgré son occurrence tardive par rapport à l'observation des adultes, il a été réalisé avant la fin des pontes. Par ailleurs, quelle que soit l'association blé dur – pois d'hiver considérée, le pourcentage de nodosités percées est inférieur à celui des pois d'hiver « purs » non traités alors même que la biomasse du pois d'hiver dans les associations est très inférieure à celle des cultures monospécifiques. On peut donc faire l'hypothèse que le nombre de sitones adultes colonisant les associations est moindre que dans le cas des cultures « pures ». Il se pourrait également que les adultes aient un niveau de ponte inférieur du fait de la perte d'énergie liée à la recherche de leur nourriture et de la dépendance entre quantité de biomasse et niveau de ponte (Landon et al. 1995). On parle alors d'un effet de dilution des ressources, à savoir que la plus faible densité de semis et de biomasse de la plante hôte dans l'association par rapport aux cultures « pures » la rend plus difficilement localisable que dans un couvert monospécifique (Vandermeer 1989). La **Figure 51** illustre cet effet à partir de l'exemple de la mouche du chou dans le cas d'une association chou – trèfle. L'association pourrait modifier à la fois la forme et la couleur du couvert c'est-à-dire les stimuli visuels mais également les odeurs (stimuli olfactifs) comme l'ont montré Finch et Collier (2000). Cela serait donc un moyen de réduire les risques d'infestation (Fujita et al 1992) en permettant de « dissimuler » visuellement et olfactivement les plantes hôtes vis-à-vis de leurs ravageurs (Quinn et al. 1996). A ces processus peuvent s'ajouter des effets répulsifs par allélopathie (Auger et al 2002).

Pour autant, dans l'association blé dur – féverole d'hiver sans intrant, on observe un résultat contraire à savoir un pourcentage de nodosités percées supérieur dans l'association que dans les cultures « pures ». On peut donc faire l'hypothèse que le blé dur n'a pas eu d'influence sur la reconnaissance de la légumineuse. Dès lors un nombre comparable de sitones serait venu se déposer sur l'association concentrant ainsi les ravageurs sur un moindre niveau de ressource et donc augmentant les dégâts, c'est ce que l'on appelle la concentration des ressources. Ces résultats sont cohérents avec d'autres études qui ont montré que par exemple une diminution de la densité de légumineuse en association conduisait à un

accroissement des dégâts de *Sitona lineatus* par plante (Landon et al. 1995). Par ailleurs, nous avons observé un niveau d'attaque moindre dans la féverole d'hiver « pure » comparativement au pois d'hiver « pur » qui s'expliquerait par un nombre de nodosités plus important sur la féverole d'hiver. Cela pointe d'ailleurs la limite de la notation du pourcentage de nodosités percées. En effet, si cette notation permet d'évaluer les dégâts par plante et donc d'en déduire un effet potentiel sur la réduction de l'activité fixatrice, elle ne permet pas de quantifier le nombre d'individus contrairement aux comptages de larves ou au piégeage des jeunes adultes. Un autre moyen indirect d'évaluation des dégâts et des populations de sitones serait de comparer les niveaux d'attaque de sitones avec les taux de fixation symbiotique. En effet, ce dernier peut être réduit de façon significative par les attaques larvaires comme cela a été mis en évidence entre autres dans le cas de mélanges orge – pois de printemps (Corre-Hellou et Crozat 2004).

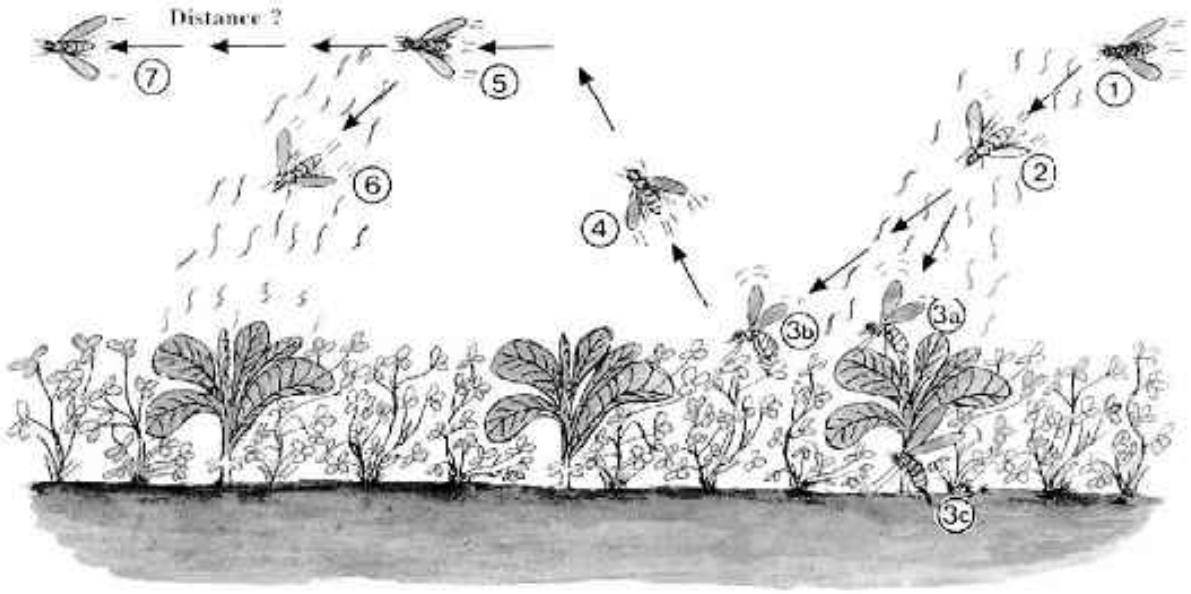


Figure 51 *Effet de l'entourage proche (trèfle) sur la reconnaissance de la culture (chou) par la mouche du chou dans le couvert, d'après Finch et Collier (2000) : 1) la mouche sent une odeur diffuse de sa plante hôte présente dans l'association ; 2) quand les composés odorants sont assez concentrés dans l'air, elle descend vers la culture. Le chou étant en association, la perception de l'insecte (à une distance < 1m) est troublée par une végétation « verte » se confondant avec le chou. Soit la mouche atterrit sur le chou (3a) pour descendre pondre à sa base en (3c), soit elle atterrit sur le trèfle (3b) puis repart en (4). Le processus se répète ensuite (5, 6 et 7).*

En ce qui concerne le nombre de larves collectées sur les racines, il apparaît que celui-ci ait été légèrement plus élevé dans le cas des cultures sans intrant (pois d'hiver « pur », féverole d'hiver « pure » et association blé dur – féverole d'hiver) alors que nous n'avons pas observé de différence entre les autres cultures monospécifiques et les associations. Pour autant, il est relativement délicat de conclure sur ce point en raison de la forte variabilité observée mais également des difficultés à réaliser correctement et sans biais cette mesure. En effet, il est difficile de prélever la même quantité de terre et il est très probable que de nombreuses racines n'ont pu être collectées correctement. Enfin, nous avons utilisé un tamis de 1 mm ce qui n'a certainement pas permis de récupérer l'ensemble des larves mais uniquement celles du dernier stade larvaire. Il serait donc préférable à l'avenir d'utiliser un tamis de 0.5 mm et d'exprimer le nombre de larves en fonction : i) de la masse de l'échantillon de sol, ii) du nombre de nodosités ou iii) de la biomasse racinaire.

Les pièges à émergence – servant à collecter les jeunes adultes à leur sortie du sol – semblent plus fiables pour estimer les populations viables de jeunes sitones. Ils ont permis de mettre en évidence une émergence principalement entre le 30 avril et le 18 juin pour le pois d'hiver soit juste avant la maturité physiologique de celui-ci. A contrario, l'émergence des jeunes adultes a eut lieu majoritairement entre le 22 juin et le 11 juillet sur la féverole d'hiver. Ces résultats sont cohérents avec la diminution du nombre de nodosités actives et donc de nourriture pour les jeunes adultes sur le pois d'hiver avant que cela n'apparaisse sur la féverole d'hiver et ce en raison du décalage de maturité entre ces deux espèces. Par ailleurs, il est possible que nous n'ayons pas piégé ni les premiers ni les derniers adultes du fait que l'émergence se déroule de mi avril à fin août soit avant la mise en place des pièges et après leur retrait. De plus, le système de piégeage utilisé ne permet de collecter que les individus émergents sur une surface de 113 cm^2 autour des plantes qui ont été sacrifiées. Par ailleurs, les pièges ont été posés lorsque le sol était sec et il est possible que des individus aient pu émerger en passant par des fissures du sol et non par les pièges. Pour autant, ces conditions ayant été comparables pour l'ensemble des traitements, nous pouvons considérer que cela n'a pas biaisé les résultats mais ne permet néanmoins pas de quantifier la population totale de jeunes adultes émergents.

Enfin, le nombre d'individus a été exprimé par plante puis par unité de surface. Il est relativement discutable de considérer que, lorsqu'un piège est posé à l'emplacement d'une ou plusieurs plantes il ne recueille que les larves présentes sur les racines de celles-ci. En effet, les systèmes racinaires des plantes adjacentes étant enchevêtrés, il est très probable que les individus collectés dans un piège proviennent de différentes plantes, de même qu'il est très probable que de nombreuses larves présentes sur ces plantes émergent à l'extérieur du piège. Par conséquent, nous pensons qu'il est préférable de rapporter le nombre d'individus collectés à une unité de surface – ce qui permet de s'affranchir des différences de densité ce qui est d'autant plus important qu'elles varient fortement entre les différents traitements.

Finalement, cette expérimentation nous a permis de mettre en évidence un nombre de jeunes sitones ayant émergé moindre dans le cas de la féverole d'hiver « pure » N0P1 et supérieur dans le cas du pois d'hiver « pur » sans intrant (N0AB*). Cela semble indiquer que le traitement insecticide a eut un effet sur la population de sitones et/ou sur leur activité de ponte dans le cas du pois d'hiver mais pas de la féverole d'hiver. Cela semble cohérent avec le développement plus tardif des sitones sur la féverole d'hiver sur lequel le traitement insecticide n'aurait pas eu d'effet. De plus, nous avons constaté que les sitones avaient d'abord attaqué les feuilles de pois d'hiver puis s'étaient attaqués à la féverole d'hiver. Ce résultat semble indiquer une préférence alimentaire pour le pois d'hiver en début de cycle et pour la féverole d'hiver ensuite en lien peut-être avec le vieillissement du pois d'hiver qui deviendrait moins appétant. Ces différences pourraient s'expliquer aussi par la présence de facteurs anti-nutritionnels tels que les tannins ou les alcaloïdes qui sont des molécules qui ont été identifiées sur des variétés de lupin blanc comme permettant de réduire les attaques de sitones (Cantot et Papineau 1983). Quoiqu'il en soit, il est probable que les sitones aient commencé à pondre plus tôt sur le pois d'hiver que sur la féverole d'hiver d'où une émergence plus tardive sur cette dernière. On peut également émettre l'hypothèse selon laquelle les sitones se seraient déplacés sur la féverole d'hiver avant même de pondre sur les pois d'hiver ce qui indiquerait par ailleurs que notre protocole et notamment la taille des parcelle ne sont pas adaptés à l'étude de tels ravageurs. Le nombre supérieur de larves ayant émergé sur la féverole d'hiver pourrait aussi s'expliquer par le niveau de biomasse très supérieur de la féverole d'hiver par rapport au pois d'hiver du fait de la dépendance entre quantité de biomasse et niveau de ponte (Landon et al. 1995). Par ailleurs, il semblerait que les associations blé dur – pois d'hiver n'ont pas permis de réduire significativement le nombre de sitones et au contraire ont engendré un accroissement de leur population comparativement aux cultures « pures » à l'exception de l'association en « vrac » semée tardivement – pour

laquelle la biomasse du pois d'hiver était extrêmement faible – et de l'association avec la féverole d'hiver. Cependant la variabilité observée ne permet pas de conclure avec certitude sur ce point et un travail spécifique mériterait donc d'être réalisé.

VII.4.4. Associations et pucerons verts du pois d'hiver

Aucun effet significatif des associations blé dur – pois d'hiver n'a été mis en évidence sur les populations et les dégâts occasionnés par les sitones comparativement aux cultures « pures » de pois d'hiver. Par contre, les associations semblent être un moyen efficace de réduire les populations de pucerons verts du pois d'hiver par rapport aux cultures « pures » de cette même légumineuse. Ceci a semblé être le cas quels que soient les dates de semis, structures du couvert ou densités des associations. Pour autant, il est important de noter que le niveau d'infestation a été relativement faible avec en moyenne pour les deux dates de mesures (15 avril et 19 mai) moins de un puceron par plante de pois d'hiver en association et un maximum en culture « pure » de sept individus par plante. Toutefois d'autres résultats préliminaires obtenus en 2005-2006 et 2006-2007 confirment les observations obtenues en 2007-2008. Dans le cas des cultures de féverole d'hiver en « pur » ou en associations l'absence de puceron ne permet pas de tirer de conclusion quand à l'effet positif ou négatif des mélanges plurispécifiques. Par ailleurs, il serait hasardeux de chercher à comparer la sensibilité du pois d'hiver et de la féverole d'hiver vis-à-vis des pucerons puisque ces deux légumineuses ne sont pas sensibles aux mêmes espèces à savoir *Acyrthosiphon pisum* Harry pour le pois d'hiver et *Aphis fabae* Scopoli et *Megoura viciae* Buckton pour la féverole d'hiver.

La diminution du nombre de pucerons verts dans les associations blé dur – pois d'hiver aussi bien par plante que par unité de surface pourrait s'expliquer par un effet de dilution des ressources (Vandermeer 1989 ; Finch et Collier 2000 ; Fujita et al 1992) qui rendrait – comme nous l'avons vu précédemment – la reconnaissance du pois d'hiver plus difficile dans les couverts plurispécifiques. Néanmoins, cela suppose que le puceron vert ait la capacité de choisir sa plante hôte ce qui semble peu probable étant donné que cet insecte – à la différence du sitone – est transporté par les courants d'air et tomberait donc aléatoirement sur les couverts. Ainsi, si cette dilution joue un rôle dans la régulation des populations de pucerons, cela n'interviendrait que lors de la reconnaissance par contact c'est-à-dire lorsque le puceron se pose sur le couvert végétal. Cela met d'ailleurs en évidence l'importance des mécanismes de colonisation des insectes qui dépendent à la fois de la nature des espèces végétales en mélange, de leur densité de semis mais également des insectes ravageurs (Trenbath 1993).

Dans un couvert monospécifique, lorsque le puceron se déplace, il se trouve toujours sur une plante hôte sur laquelle il peut se nourrir et se reproduire. Par contre, lorsque celui-ci atterrit sur une plante de pois d'hiver en association il peut devoir – pour atteindre une autre plante hôte – se déplacer sur une plante de blé dur (ce principe est détaillé sur la **Figure 52** dans le cas de la mouche du chou et d'une association trèfle – chou à ceci près qu'à la différence de la mouche le déplacement du puceron se ferait plutôt en se déplaçant au sol ou de plante à plante « en marchant » et non en volant). Dès lors, la distance moyenne à parcourir et donc la dépense énergétique du puceron pour aller d'une plante de pois d'hiver à une autre se trouverait augmentée dans les associations ce qui contribuerait à réduire sa capacité de reproduction et donc le développement des colonies. On parle alors d'un effet « barrière physique » car la ou les espèces non hôte de l'association forment un obstacle physique à la progression du ravageur de la seconde espèce (Baliddawa 1984). Par ailleurs, cet effet « barrière » peut venir d'une modification de la forme de l'espèce hôte qui peut, par exemple, être plus haute ou plus étiolée en association par rapport aux couverts monospécifiques. Enfin, dans certains cas l'effet de l'espèce associée peut être indirect en modifiant – comme nous l'avons signalé précédemment – l'aspect général du couvert à savoir sa texture, sa couleur ou son odeur (Perrin 1977 ; Altieri et al. 1978 ; Finch et

Kienegger 1997) rendant ainsi la reconnaissance de la plante hôte plus difficile. Notons par ailleurs que l'affinité des insectes pour leur plante hôte est grande car une multitude de facteurs interviennent (visuels, odeurs, stimuli tactiles ou gustatifs...). Il faut donc généralement brouiller plusieurs de ces éléments pour qu'une zone « approprié » deviennent « inappropriée » pour le ravageur (Finch et Collier 2000), ce qui pourrait être le cas des associations. Enfin, les mélanges d'espèces pourraient être, en raison d'une modification du microclimat comparativement aux couverts monospécifiques de légumineuses, des habitats moins favorables aux pucerons.

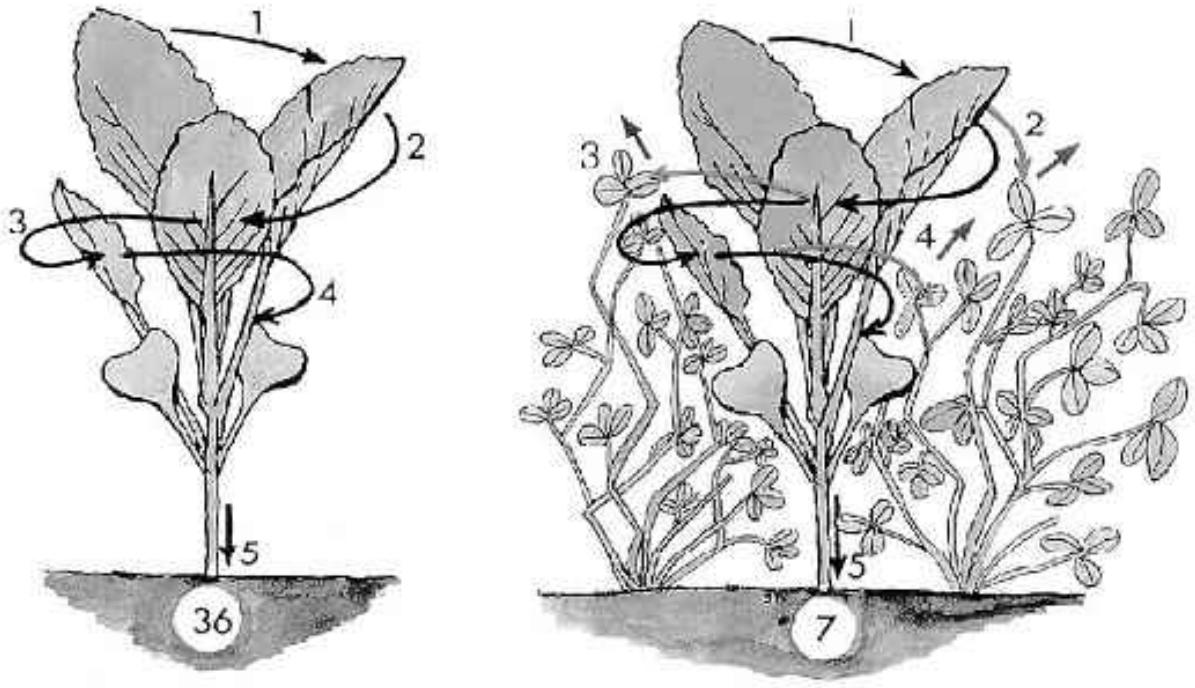


Figure 52 *Effet de l'environnement proche (trèfle) sur l'acceptation de la plante hôte (chou) par la mouche du chou. D'après Finch et Collier 2000. Les numéros fléchés représentent quatre vols de feuille à feuille réalisés par l'insecte pour vérifier s'il est bien sur la plante hôte dans laquelle il va pondre ses œufs. Le nombre en bas de la plante représente le pourcentage d'insectes ravageurs qui parviennent jusqu'à leur lieu de ponte au collet de la plante.*

Les auxiliaires des cultures, notamment les syrphes et les coccinelles, sont des facteurs de régulations importants des populations de pucerons, qui pourraient avoir une efficacité différente selon les couverts. On peut émettre l'hypothèse que ces auxiliaires sont plus à même de réduire les populations de pucerons lorsque celles-ci sont faibles ou présentent une dynamique de croissance réduite, ce qui – comme nous l'avons déjà signalé – pourrait être le cas dans les cultures associées. Par ailleurs, la diversité végétale des associations permettrait d'accroître et de diversifier les populations d'auxiliaires des cultures aussi bien d'un point de vue de leurs régimes alimentaires que de leurs stratégies de prédation (Root 1973 ; Baliddawa 1984 ; Mote et al. 2001 ; Altieri 1999 ; Altieri et Nicholls 2004). Toutefois, on pourrait penser que cette diversification végétale pourrait également se traduire par une augmentation du nombre d'espèces de ravageurs. Il semblerait néanmoins que les cultures diversifiées tendent à défavoriser les ravageurs et à favoriser les auxiliaires par rapport aux cultures monospécifiques (Agriculture et biodiversité, valoriser les synergies. Expertise collective scientifique INRA 2008) sous réserve que ces systèmes aient été conçus à cet égard, à savoir de façon à favoriser les auxiliaires des cultures.

VII.4.5. Associations et adventices

Au cours de cette expérimentation, le niveau d'infestation par les mauvaises herbes a été important avec en moyenne 0.7 t ha^{-1} avec des micro-parcelles où l'on a atteint 3.2 t ha^{-1} à la récolte. L'aspect climatique est un élément majeur mais non suffisant pour expliquer ces niveaux importants d'adventices et il semble évident que les populations d'adventices ont été mal contrôlées sur cette parcelle lors des années précédentes. Cela est d'autant plus notable que le précédent cultural était un tournesol – une culture où le désherbage est théoriquement aisé. Par ailleurs, nous avons observé un accroissement de la quantité d'adventices sur le bloc 3 et plus précisément un accroissement de la biomasse dans la diagonale de la parcelle expérimentale. Ce gradient peut être relié à une différence de texture du sol, à savoir une moindre infestation dans les parcelles dont la texture était de type limono-argileuse et inversement pour celles dont la texture était plutôt argilo-limoneuse voire argileuse.

Les principales espèces d'adventices rencontrées au cours de cet essai ont été les matricaires et la folle avoine avec également quelques chardons relativement localisés. Il est important de noter que le désherbage chimique en cours de culture n'est pas possible dans le cas des associations en raison de l'absence de produit homologué simultanément sur légumineuse d'hiver et sur blé dur. Dès lors, le désherbage des associations blé dur – pois d'hiver et blé dur – féverole d'hiver ne peut se faire que de façon mécanique en cours de culture (e.g. herse étrille) et/ou par l'utilisation d'un désherbage chimique en prélevée et/ou par la réalisation de faux semis.

Le pois d'hiver est une culture considérée, à juste titre, comme peu compétitive vis-à-vis des adventices, ce que nous avons pu observer dans cet essai puisque le niveau d'infestation des cultures « pures » de pois d'hiver a été très supérieur à celui des cultures « pures » de blé dur. Par ailleurs, il semblerait que dans nos conditions expérimentales le désherbage par les deux passages de herse étrille ait été aussi efficace voire plus que le désherbage chimique du pois d'hiver en prélevée. Cependant, il ne s'agit là que des résultats d'une année dont l'analyse est rendue délicate par la forte variabilité d'infestation des micro-parcelles. Par ailleurs, il pourrait également s'agir d'un effet de densité puisque la culture de pois d'hiver sans intrant présentait 75 plantes m^{-2} contre 58 plantes m^{-2} dans les autres cultures « pures ». Néanmoins, dans le cas des cultures « pures » de féverole d'hiver, le nombre de plantes par mètre carré a été identique dans les différents traitements mais la quantité de biomasse des adventices a été significativement réduite en N0AB*, ce qui indiquerait une meilleure efficacité – dans cet essai et cette année là – du désherbage mécanique.

L'autre résultat remarquable vient du fait que les semis tardifs (les cultures « pures » d'Acalou et les associations d'Acalou avec le pois d'hiver Lucy) ont été plus infestés que les semis précoces. Cela peut s'expliquer par deux éléments majeurs : i) la production de biomasse des semis tardifs a été moindre et donc moins concurrentielle vis-à-vis des adventices, à moins que la moindre biomasse du blé dur ne soit la conséquence d'un niveau d'infestation supérieur par les adventices et ii) le désherbage chimique des semis tardifs a été réalisé en même temps que celui du semis précoce (un mois et demi avant le semis tardif), ce qui revient à considérer qu'ils n'ont pas été désherbés et expliquerait donc le développement plus important des adventices.

Par ailleurs, et il s'agit là de l'objet de notre étude, les associations ont présenté des efficacités différentes vis-à-vis des adventices. Dans le cas des semis tardifs, les associations blé dur – pois d'hiver ont été moins efficaces que les cultures « pures » de blé dur et comparables à celles des couverts monospécifiques de pois d'hiver. Ces résultats pourraient s'expliquer par une moindre biomasse des associations au début du printemps. Cependant, les associations semées tardivement en ligne et en « vrac » ont produit 7.8 t ha^{-1} et 5.5 t ha^{-1} de matière sèche contre 7.2 t ha^{-1} pour la culture de blé dur « pure » semée à la même date et la

biomasse des adventices a été respectivement de 1.1 t ha^{-1}, 1.4 t ha^{-1} et 0.6 t ha^{-1} pour ces trois systèmes. Par conséquent, la biomasse totale de l'association blé dur – pois d'hiver ne suffit pas à expliquer à elle seule la différence quantitative d'adventices observée.

Nos résultats indiquent clairement que la quantité de mauvaises herbes dans l'association blé dur – pois d'hiver est déterminée par la quantité de blé dur et non pas par la biomasse totale de l'association ou son taux de couverture global. En d'autres termes, ce serait le blé dur dans l'association blé dur – pois d'hiver qui déterminerait la production d'adventices. Cette hypothèse est cohérente avec le fait que l'association additive a eu le niveau de biomasse d'adventices le plus élevé par rapport aux autres associations semées à la même date. A l'inverse, la quantité d'adventices a été moindre dans l'association blé dur – féverole d'hiver sans intrant qu'en culture « pure » de blé dur mais supérieur à la culture « pure » de féverole d'hiver. Cela semble indiquer que dans ce système c'est la production de légumineuse qui a déterminé le niveau de biomasse des adventices.

En conclusion, les associations blé dur – pois d'hiver semblent performantes pour réduire la quantité d'adventices comparativement aux cultures « pures » de pois d'hiver. Cela s'expliquerait par la présence du blé dur qui diminuerait la quantité de lumière, d'eau et de minéraux disponibles pour les adventices comme cela a été montré par plusieurs auteurs dans le cas d'autres associations d'espèces (Poggio 2005 ; Baumann et al 2002 ; Vilich-Meller 1992). Fenandez-Aparicio et al. (2007) ont montré en particulier que les mélanges céréale – légumineuse pouvaient être particulièrement intéressant pour contrôler le développement de l'orobranche qui peut réduire fortement la production de pois protéagineux d'hiver. Par contre, les associations blé dur – pois d'hiver ne semblent pas performantes pour diminuer la biomasse des adventices comparativement aux cultures « pures » de blé dur. Toutefois, on a obtenu une bonne efficacité dans le cas de l'association blé dur – féverole d'hiver car la biomasse de la légumineuse était élevée, permettant une bonne couverture du sol et une diminution de la quantité de lumière disponible pour les adventices.

VII.5 Performance économique des associations

L'analyse économique doit être analysée avec précaution. Tout d'abord parce qu'il s'agit là des résultats d'une campagne, ce qui ne permet pas de généraliser les conclusions. D'autre part parce que les itinéraires techniques comparés ne sont pas parfaitement raisonnés, à savoir que nous avons utilisé les mêmes charges matérielles et opérationnelles pour le travail du sol, la récolte et le déchaumage alors mêmes que ces éléments doivent être adaptés en fonction de la culture.

Le prix de vente des productions et en particulier le différentiel entre blé dur et légumineuse d'une part et entre conventionnel et agriculture biologique d'autre part est un point clé du bilan économique et donc de l'évaluation de la performance des associations. Ceci est d'autant plus problématique que l'on se trouve dans un contexte de volatilité des prix importante comme cela a été particulièrement remarquable en 2007 où le prix du blé dur est passé de 200 € t^{-1} au premier trimestre à 450 € t^{-1} au quatrième trimestre avec des variations pouvant atteindre les 20 € t^{-1} par jour (Everling, 10ème journée nationale filière blé dur ARVALIS institut du végétal 2008).

Un autre élément particulièrement important est que nous considérons que nos systèmes sans intrant (N0AB*) s'apparentent à de l'agriculture biologique et donc peuvent être valorisés comme tels quand bien même la parcelle d'essai n'est pas certifiée. Cette hypothèse est acceptable si l'on compare les associations N0AB* avec les cultures « pures » N0AB*. Il en est de même lorsque l'on compare – pour une année donnée – les marges directes entre systèmes conventionnels et agriculture biologique puisque l'on part d'une situation initiale similaire. Par contre, une comparaison pluriannuelle entre systèmes conventionnels et

agriculture biologique nécessiterait de prendre en considération l'évolution des caractéristiques pédologiques mais également de la pression des facteurs biotiques.

Il est important de noter que l'amélioration de la teneur en protéines du blé dur dans les associations en agriculture biologique (AB*) a permis d'augmenter fortement la valorisation économique. En effet, alors que le blé dur cultivé seul aurait été vendu à 228 € t^{-1} (190 € t^{-1} de base + 38 € t^{-1} de bonus protéines) le blé dur associé a lui été valorisé à 325 € t^{-1} (190 € t^{-1} de base + 135 € t^{-1} de bonus protéines) soit une augmentation de 43%. Dans le cas des systèmes conventionnels, l'amélioration de la teneur en protéines ne représente pas un tel enjeu puisque le prix ne tient pas compte de la teneur en protéines en dessous de 14 % et des valeurs de mitadinage élevées ne sont pas non plus très pénalisantes (malus au maximum de 30 € t^{-1}).

Cela confirme donc l'intérêt des associations pour les systèmes biologiques, qui en améliorant significativement la teneur en protéines du blé dur, permettent dans notre exemple de valoriser les grains en alimentation humaine pour la fabrication de semoule et de pâtes de qualité et non en alimentation animale. Par ailleurs, l'assurance de produire du blé dur de qualité technologique suffisante pourrait permettre la mise en place d'une filière blé dur en agriculture biologique en assurant aux coopératives des volumes réguliers et de qualité. Cela leur permettrait plus précisément de stabiliser le marché en garantissant le débouché de leur collecte au moyen notamment de la contractualisation avec des semouliers.

Toutefois, les résultats obtenus ont permis, au moins dans le cas de cette expérimentation et en considérant l'état actuel des prix, de montrer que les associations blé dur – pois d'hiver et blé dur – féverole d'hiver étaient moins performantes économiquement que les cultures « pures » et ceci quel que soit le système considéré. Pour autant, nous proposons de calculer la marge directe en considérant d'autres hypothèses, non pas dans le but de démontrer que ces systèmes peuvent être performants mais pour indiquer les leviers dont on dispose pour en améliorer le bilan économique :

- Nous avons réalisé le semis des associations en ligne en deux fois mais il est raisonnable de penser que cela pourrait se faire en un seul passage avec du matériel adapté comme par exemple un semoir compartimenté, ce qui permettrait de diminuer les charges matérielles de 40 € ha^{-1}. On peut également faire l'hypothèse qu'en adaptant les densités de semis on pourrait avoir dans des associations en mélange sur le rang les mêmes niveaux de production que dans les mélanges en lignes, *a priori* en augmentant la densité du pois d'hiver et/ou en réduisant celle du blé dur.

- Comme nous l'avons également montré, le coût lié au tri des graines est le poste de dépense majeur. Dans notre exemple nous avons pris comme base de prix 50 € t^{-1}, ce qui correspond à un triage à la ferme pour la préparation de semences. Cela correspond également au coût du tri dans une coopérative dont le matériel ne serait pas adapté à recevoir des associations. En effet, à la différence du tri des impuretés dans une récolte, le tri des associations nécessite de récupérer les deux espèces. Dès lors, il faut que le trieur soit connecté à deux cellules différentes pour pouvoir stocker séparément les deux produits. Or aujourd'hui cela n'est généralement par le cas et il faut donc régulièrement vider l'élément du trieur qui habituellement recueille les impuretés. Dès lors, cela augmente fortement le coût de la main d'œuvre et donc celui du tri. Toutefois, il est raisonnable de penser que ce coût pourrait être abaissé si des investissements étaient réalisés, ce qui peut être envisagé si les volumes de collecte d'associations d'espèces devenaient plus importants.

Sur la base de cette hypothèse nous avons intégré dans ce nouveau calcul de marge directe un coût du triage de 15 € t^{-1} (contre 50 € t^{-1} au préalable) ce qui est cohérent avec les chiffres avancées par certaines coopératives autour de 10 € t^{-1}. Là encore, il est délicat de donner un chiffre moyen puisque ce coût dépend fortement de la qualité du mélange. En effet, comme nous l'avons observé lors d'une évaluation grandeur nature à la coopérative Agribio Union en 2009, le tri des associations ne pose pas de problème technique particulier sauf lorsque le mélange comporte de nombreux fragments de légumineuse (de petite taille) qui sont relativement difficile à séparer du blé dur. Ce point montre qu'une attention toute particulière doit être apportée lors de la récolte dans le choix des réglages de la moissonneuse batteuse et ceci de façon à ne pas casser les grains de légumineuse mais tout en battant suffisamment les épis de blé dur pour en extraire les grains. Là encore il est raisonnable de penser que l'expérience et la pratique permettront aux agriculteurs de réaliser cette étape dans de bonnes conditions et ne doit pas être vu comme un élément rédhibitoire.

- Un autre élément d'importance consiste à savoir si les associations blé dur – légumineuse sont éligibles aux aides PAC et si oui à quelles primes ? Nous avons fait l'hypothèse que les associations pouvaient être éligibles aux aides blé dur, à l'exception de la prime qualité, lorsque le rendement du blé dur était supérieur à celui de la légumineuse et aux aides protéagineux dans le cas contraire. Toutefois il serait logique que les associations puissent bénéficier de ces deux aides puisqu'elles contiennent les deux espèces. Cependant, s'agissant d'aides à la surface on pourrait imaginer qu'une association où chaque espèce occupe finalement 50% de l'espace au semis, puisse bénéficier de l'aide blé dur à hauteur de 50% et de l'aide protéagineux également à 50%.

  Par ailleurs et en toute logique, si la prime qualité a pour objectif d'aider à produire des grains de qualité alors les associations – qui permettent comme nous l'avons vu d'accroître la teneur en protéines du blé dur – devraient elles aussi pouvoir en bénéficier. Pour pousser la logique jusqu'au bout il faudrait toutefois considérer un coefficient de réduction de l'aide en fonction de la densité de semis du blé dur en association par rapport aux 220 grains m^{-2} minimum nécessaires pour avoir le droit à cette prime. Dans la situation actuelle cela reviendrait à aider les associations, en Midi-Pyrénées, à hauteur de 61 € ha^{-1}. Ainsi, les associations seraient moins aidées que les cultures « pures » de blé dur (72 € ha^{-1}) mais plus que les protéagineux seuls (56 € ha^{-1}). Par ailleurs, si l'on intègre dans ce nouveau calcul de la marge directe l'aide supplémentaire aux protéagineux qui sera mise en place dès 2010 et dont le montant devrait être à terme proche de 100 € ha^{-1} (40 millions d'euros pour un objectif de 400000 ha de protéagineux. Source : UNIP 2009), alors nous pouvons considérer que les associations pourraient percevoir une aide supplémentaire de 50 € ha^{-1} soit au total une aide de 111 € ha^{-1} ce qui finalement rendrait les associations plus aidées que le blé dur mais moins que les protéagineux « purs » (156 € ha^{-1}).

Au final, l'intégration de ces différentes hypothèses dans le calcul de la marge directe des associations permettrait de l'augmenter en moyenne de 229 € ha^{-1}. En conséquence, les LER calculés à partir de cette nouvelle marge directe (**Tableau 23**) montrent que les associations seraient, à l'exception du mélange en « vrac » semé tardivement et de l'association blé dur – féverole d'hiver N0P1, aussi performantes économiquement que les cultures « pures » (LER moyen de 1.01). Plus précisément, la marge directe des associations est supérieure à celle du pois d'hiver ($LER_{MD\text{-}Leg}$=1.23) sauf dans le cas des mélanges semés

tardivement (LER_{MD-Leg}=0.79), inférieure à celle de la féverole d'hiver (LER_{MD-Leg}=0.85) et à celle du blé dur (LER_{MD-BD}=0.89).

Ainsi et comme précédemment, la performance des associations augmente lorsqu'on les compare avec une proportion plus importante de légumineuse ($LER_{MD-1:2}$ et $LER_{MD-1:3}$) et inversement lorsque la proportion du blé dur augmente ($LER_{MD-2:1}$ et $LER_{MD-3:1}$). Notons que dans le cas des associations en ligne et mélange sur le rang avec Acalou les LER calculés pour les différentes proportions ne varient pas ce qui s'explique par le fait que le blé dur et le pois d'hiver qui servent de référence ont sensiblement la même marge directe (356 € ha^{-1} et 362 € ha^{-1} respectivement).

L'association en ligne avec Neodur présente un LER de 1.10 quand on considère une proportion identique de blé dur et de pois d'hiver, de 1.01 lorsque l'on considère 3 fois plus de blé dur que de pois d'hiver ($LER_{MD-3:1}$) et de 1.20 lorsque l'on compare la marge directe de l'association avec 75% de blé dur et 25% de pois d'hiver ($LER_{MD-1:3}$). L'autre association présentant un bilan économique positif comparativement aux cultures « pures » est l'association additive avec le pois d'hiver dont le $LER_{MD-1:1}$ est de 1.01 mais qui augmente jusqu'à 1.11 lorsque l'on considère 75% de pois d'hiver et 25% de blé dur.

Ces résultats indiquent que les associations ne sont pas performantes économiquement comme nous l'avons vu précédemment (**Tableau 22**) mais elles pourraient le devenir si les hypothèses formulées se vérifient à l'avenir (**Tableau 23**). Nous pensons que ces hypothèses sont tout à fait réalistes.

					Blé dur - Pois					Blé dur - Féverole	
					Neodur			Acalou		L1823	
					N35P1		N0P1	N35P1		ICFlin	
					ICPlin	ICPmix	ICPadd	ICPlin	ICPmix	N0AB*	N0P1
Marge directe des associations (€ ha^{-1})					481	407	444	352	220	968	497
LER	MD association	÷	MD Blé dur	= LER_{MD-BD}	0,94	0,79	0,86	0,99	0,62	1,14	0,91
			MD Légumineuse	= LER_{MD-Leg}	1,33	1,13	1,23	0,97	0,61	0,90	0,79
	2 * MD association	÷	(MD Blé dur + MD Légumineuse)	= $LER_{MD-1:1}$	1.10	0.93	1.01	0.98	0.61	1.01	0.85
	3 * MD association	÷	(2 x MD Blé dur + MD Légumineuse)	= $LER_{MD-2:1}$	1.04	0.88	0.96	0.98	0.61	1.05	0.87
			(MD Blé dur + 2 x MD Légumineuse)	= $LER_{MD-1:2}$	1.17	0.99	1.08	0.98	0.61	0.97	0.83
	4 * MD association	÷	(3 x MD Blé dur + MD Légumineuse)	= $LER_{MD-3:1}$	1.01	0.86	0.93	0.99	0.62	1.07	0.88
			(MD Blé dur + 3 x MD Légumineuse)	= $LER_{MD-1:3}$	1.20	1.02	1.11	0.98	0.61	0.95	0.82

Tableau 23 *Land equivalent ratio calculés à partir des marges directes (€ ha^{-1}) pour les différentes associations en comparant : i) 1 ha d'association avec 1 ha de blé dur (LER_{MD-BD}) ou avec 1 ha de légumineuse (LER_{MD-Leg}), ii) 2 ha d'association avec 1 ha de blé dur et 1 ha de légumineuse ($LER_{MD-1:1}$), iii) 3 ha d'association avec 2 ha de blé dur et 1 ha de légumineuse ($LER_{MD-2:1}$) ou avec 1 ha de blé dur et 2 ha de légumineuse ($LER_{MD-1:2}$) et iv) 4 ha d'association avec 3 ha de blé dur et 1 ha de légumineuse ($LER_{MD-3:1}$) ou avec 1 ha de blé dur et 3 ha de légumineuse ($LER_{MD-1:3}$). Dans le cas de l'association blé dur – féverole d'hiver N0P1 la référence blé dur est le traitement N75P2. Une valeur de LER supérieure à 1 indique que l'association est plus efficace que les cultures pures (selon le ratio de surface blé dur/pois considéré) du point de vue de la marge directe et vice versa (voir* ***Chapitre II, Partie V*** *pour plus de détails).*

VIII.Conclusion : les itinéraires techniques d'associations sont-ils performants ?

Nos résultats ont permis de montrer que les prototypes d'association blé dur – pois d'hiver et blé dur – féverole d'hiver testés ont globalement répondu aux objectifs ayant servi de cadre à leur conception (**Tableau 24**). En particulier, les associations ont permis d'améliorer l'utilisation des ressources du milieu, et notamment l'azote, pour la production de biomasse et de rendement – à l'exception toutefois des associations semées tardivement avec Acalou pour lesquelles la production de pois d'hiver a été fortement réduite et de l'association du blé dur L1823 avec la féverole d'hiver où la production de blé dur a été insuffisante en raison d'une densité trop faible du blé dur. Les différentes associations ont permis, comme nous en avions fait l'hypothèse, d'améliorer significativement la teneur en protéines du blé dur par rapport aux cultures monospécifiques.

Par ailleurs, les associations ont eu un effet positif sur la septoriose du blé dur et un effet neutre ou positif sur le développement de l'anthracnose du pois d'hiver et de la féverole d'hiver. Enfin, les prototypes testés ont mis en évidence un effet positif des associations sur le contrôle des populations de pucerons verts du pois d'hiver mais une absence d'effet ou un faible effet sur le sitone qui est un insecte plus mobile probablement apte à détecter sa cible à une distance plus importante que le puceron.

Ces résultats encourageants doivent cependant être nuancés par le fait qu'il ne s'agit que des données provenant d'une année d'expérimentation d'itinéraires techniques. Ceci est particulièrement important dans le cas des maladies et ravageurs dont la pression peut varier fortement en fonction des conditions climatiques et de l'histoire culturale de la parcelle. Par conséquent, nous pensons qu'il est important de réaliser un travail spécifique sur l'évaluation des associations blé dur – légumineuse à graines vis-à-vis des bio-agresseurs (maladies, ravageurs et adventices) afin de confirmer ou non le potentiel des mélanges plurispécifiques et ceci dans le cadre d'un protocole expérimental adapté avec entre autres des parcelles de plus grande taille.

Identifiant				LER rendement	LER azote accumulé	Protéine	Septoriose blé dur	Anthracnose légumineuse	Sitones	Pucerons
IC P	N35P1	lin	Nd	++	+	++	++	++	+/=	+
			Ac	++	+	+	+	?	+/=	+
		mix	Nd	–	–	++	++	+	+/=	+
			Ac	– –	– –	++	–	?	+/=	+
	N0P1	add	Nd	+++	+++	+++	++	=	+/=	+
IC F	N0AB*	lin	L1823	–	+	+++	+	=	+/–	?

Tableau 24 *Synthèse des aspects positifs (+), négatifs (-), neutres (=) ou indéterminés (?) des prototypes d'itinéraires techniques de cultures associées testés vis-à-vis du rendement, de l'azote accumulé, de la teneur en protéines du blé dur, de la septoriose du blé dur, de l'anthracnose du pois d'hiver et de la féverole d'hiver, des sitones et des pucerons.*

Par ailleurs, la réduction possible des maladies et de certains ravageurs et la meilleure valorisation des sources naturelles d'azote (azote de l'air et azote du sol provenant de la minéralisation de l'azote organique) font des associations des systèmes économes en intrants. Or, dans un contexte d'augmentation du coût des intrants et notamment des produits phytosanitaires et de l'engrais ces systèmes devraient devenir de plus en plus compétitifs d'un point de vue économique, qui plus est si une politique agricole adaptée est mise en place et que les coûts du triage sont réduits.

Un autre élément important, réside dans le fait que la production de légumineuses à graines dans les cultures associées ne doit pas être vue comme une production secondaire et ceci quand bien même notre objectif premier était de produire du blé dur de qualité. Cela est particulièrement vrai dans le cas des systèmes d'agriculture biologique où la valorisation économique des légumineuses est forte alors que dans les systèmes conventionnels elles sont moins bien valorisées que le blé dur. Dès lors, et contrairement à ce que l'on pourrait penser *a priori*, les associations ne sont pas seulement adaptées aux mélanges fourragers car c'est grâce à la valorisation des graines de légumineuses que ce système pourrait être performant économiquement. Ceci est vrai sous réserve que l'on puisse séparer correctement et à moindre frais les graines des deux espèces. Ainsi, l'utilisation de légumineuses fourragères à la place de légumineuses à graines se traduirait certainement par un bilan économique moindre. Par ailleurs, comme cela a déjà été évoqué précédemment, des itinéraires de cultures associées pourraient être conçus dans le but de produire principalement des légumineuses, ce qui serait tout particulièrement adapté pour les systèmes d'agriculture biologique où il existe une demande forte ce qui permettrait de substituer une part des importations de soja dont la traçabilité n'est pas toujours bien garantie.

Il reste cependant une question majeure à résoudre, à savoir la place de ces systèmes dans les rotations. En effet, la performance économique des associations serait d'autant plus forte qu'elles remplaceraient une surface plus importante de légumineuses que de blé dur. Or, le rôle des légumineuses n'est pas seulement d'apporter de l'azote dans les systèmes de culture par le biais de la fixation symbiotique. Elles permettent également et de manière plus générale de diversifier les productions, de rompre les cycles des maladies et ravageurs et de réduire la sélection d'adventices particulières. Il est donc important de savoir si les associations peuvent remplir ou non cette fonction et nous touchons donc là aux limites de la simple analyse agro-économique faite ici qui ne tient pas compte des aspects à long terme.

SYNTHESE DES PRINCIPAUX RESULTATS ;
CONCLUSION GENERALE ;
PERSPECTIVES ET THEMATIQUES DE RECHERCHE A DEVELOPPER POUR LA CONCEPTION D'ITINERAIRES TECHNIQUES ADAPTES AUX ASSOCIATIONS

Les expérimentations réalisées en 2005-2006, 2006-2007 et 2007-2008 sur les associations blé dur – pois d'hiver et blé dur – féverole d'hiver en testant différentes disponibilités en azote, variétés de blé dur, densités de semis, structures de couverts et protection phytosanitaires ont permis de comprendre et de formaliser un certain nombre de mécanismes du point de vue de la performance finale de ces systèmes mais également du point de vue du fonctionnement dynamique. Nos travaux ont confirmé l'intérêt global de ces systèmes en particulier dans les conditions de faible disponibilité en azote en apportant des éléments nouveaux quant à la conception d'itinéraires techniques adaptés aux cultures associées. Les hypothèses formulées au début de ce manuscrit (cf. **Chapitre I, Partie V**) serviront de fil conducteur à cette première partie de la discussion.

I. Synthèse des principaux résultats

I.1 Les associations blé dur – légumineuse à graines améliorent le rendement relatif et la qualité du blé dur

I.1.1. L'accroissement du rendement relatif des associations dépend essentiellement de la disponibilité en azote et des densités des espèces

Sur l'ensemble des expérimentations, les rendements relatifs des associations (les LER) ont été globalement supérieurs à 1 aussi bien dans le cas des mélanges blé dur – pois d'hiver que blé dur – féverole d'hiver, indiquant ainsi une meilleure efficacité des mélanges plurispécifiques pour l'utilisation des ressources du milieu (eau, lumière et nutriments dont l'azote). Les LER sont systématiquement supérieurs si l'on considère la quantité d'azote accumulée dans les parties aériennes. Ces premiers éléments confirment l'intérêt de ces systèmes d'une part pour améliorer la productivité agricole et d'autre part pour l'utilisation des ressources en azote (azote de l'air et azote minéral du sol) du fait notamment de la nutrition azotée des légumineuses qui repose, dans le cas des associations, essentiellement sur la fixation symbiotique (environ 80-85 % de l'azote accumulé provenant de l'air).

Pour autant, la performance des associations blé dur – pois d'hiver diminue avec la disponibilité en azote et plus précisément avec la disponibilité précoce en azote qui doit être, dans nos conditions expérimentales, inférieure à environ 120 kg N ha^{-1} du semis au début de la floraison du pois d'hiver (cf. **Chapitre III, Partie I**). Des niveaux de disponibilité en azote supérieurs se traduisent par une forte diminution de la production du pois d'hiver alors que celle du blé dur n'est que faiblement augmentée. Cela confirme donc que les mélanges blé dur – légumineuse à graines sont clairement mieux adaptés pour les systèmes à bas niveaux d'intrants azotés.

Dans le cas des associations blé dur – féverole d'hiver nous n'avons pas pu mettre en évidence un effet similaire de la disponibilité en azote car celui-ci a été notamment masqué par des différences de densités trop élevées ou de structure de couverts entre les différentes expérimentations (cf. **Chapitre III, Partie II**). Il serait donc intéressant d'évaluer le simple effet de la disponibilité en azote dans ces mélanges en s'affranchissant des effets de densité ou de structure de couverts. Les résultats des expérimentations menées sur les associations blé dur –féverole d'hiver ont permis de montrer que leur performance dépendait en grande partie des densités des espèces dans le mélange. Ces mélanges présentent en effet une efficacité supérieure aux cultures « pures » lorsque la densité de la féverole d'hiver n'est pas excessive (de l'ordre de 12 plantes m^{-2}) et lorsque la densité du blé dur n'est pas trop faible (plus de 110 plantes m^{-2}). A contrario, lorsque la densité de féverole d'hiver est supérieure à ce seuil ou que celle du blé dur est inférieure à cette valeur on observe une forte diminution de la production du blé dur alors que celle de la légumineuse n'est que faiblement affectée. Dans de telles conditions le mélange équivaut quasiment à une situation de culture « pure » de féverole d'hiver. Cela pose un problème majeur à savoir celui de la bonne gestion des densités des espèces dans ces systèmes et en particulier de celle de la féverole d'hiver puisqu'il suffit de quelques plantes supplémentaires de cette légumineuse pour réduire fortement la production et le rendement du blé dur associé. Notons qu'il serait intéressant d'évaluer plus en détails l'effet des densités dans de telles associations en considérant une gamme plus large de valeurs, ce qui serait également pertinent dans le cas des associations blé dur – pois d'hiver. En effet, nos résultats semblent montrer que le blé dur peut supporter une densité de pois

d'hiver supérieure à 50 % de celle des cultures « pures » sans que son rendement ne soit trop réduit ; c'est ce que nous avons vu dans le cas de l'association blé dur – pois d'hiver additive où la légumineuse a été semée à la même densité qu'en culture « pure ». Ce résultat indique d'ailleurs, comme nous en avions fait l'hypothèse, une moindre compétitivité du pois d'hiver comparativement à la féverole d'hiver vis-à-vis du blé dur dans les gammes de densités testées.

Au-delà des effets de l'azote et de la densité des espèces, leur agencement dans les couverts (en ligne ou en mélange sur le rang) est un déterminant fort de la performance des mélanges plurispécifiques qui dépend de l'équilibre entre compétitions inter- et intraspécifiques. Lorsque la disponibilité en azote augmente, les compétitions interspécifiques du pois d'hiver sur le blé dur diminuent, et inversement. Il en est de même lorsque la densité de la légumineuse est réduite ou que celle du blé dur est augmentée. La structure du couvert peut jouer un rôle similaire, à savoir que les compétitions du blé dur sur le pois d'hiver sont accrues dans les mélanges sur le rang par rapport aux mélanges en ligne et ceci bien évidemment à densité et fertilisation équivalente. De même, dans les associations blé dur – féverole d'hiver la compétition de la féverole d'hiver sur le blé dur est diminuée lorsque la distance entre les rangs de féverole d'hiver est augmentée.

I.1.2. Les associations améliorent la teneur en protéines du blé dur par une disponibilité en azote par épi supérieure

Comme nous en avions émis l'hypothèse, les associations blé dur – pois d'hiver et blé dur –féverole d'hiver permettent d'améliorer la teneur en protéines du blé dur comparativement aux cultures « pures » ayant reçu le même niveau de fertilisation et parfois même supérieure. Ces résultats s'expliquent en tout premier lieu par une diminution de la production du blé dur dans les associations comparativement aux cultures « pures », ceci aussi bien dans le cas des mélanges avec le pois d'hiver (cf. **Chapitre III, Partie I**) qu'avec la féverole d'hiver (cf. **Chapitre III, Partie II**) et pour un niveau de fertilisation azotée et une variété de blé dur donnés. L'augmentation de la teneur en protéines du blé dur en association est d'autant plus forte que sa teneur en protéines en culture « pure » est basse, ce qui démontre l'intérêt des associations dans les systèmes à bas intrants azotés pour lesquels la teneur en protéines du blé dur est *a priori* plus faible.

La diminution du rendement ne suffit pas à expliquer à elle seule l'augmentation de la teneur en protéines du blé dur. En effet, une baisse du rendement n'aurait pas d'effet sur la teneur en protéines du blé dur si la disponibilité en azote par quantité de grain de blé dur était identique en association et en culture « pure ». Cela indique donc que la disponibilité par grain de blé dur et plus largement par épi est supérieure dans les associations comparativement aux cultures « pures ». En effet, l'azote minéral du sol est disponible dans sa quasi-totalité pour le blé dur du fait que la nutrition azotée des légumineuses dans les associations repose essentiellement sur la fixation symbiotique (en moyenne 85% contre seulement 60% dans les cultures « pures »). En d'autres termes, cela signifie que les légumineuses ont, dans nos expérimentations, utilisé moins de 15 kg N ha^{-1} d'azote provenant du sol ce qui représente, dans nos conditions expérimentales, en moyenne à peine 15% de l'azote accumulé dans les parties aériennes du blé dur en association.

Par ailleurs, plus la réduction du rendement du blé dur sera forte plus l'augmentation de la teneur en protéines sera élevée – comme nous l'avons montré à l'extrême dans le cas des associations du blé dur avec la féverole d'hiver en 2006-2007. En effet, dans ces situations le rendement du blé dur inférieur à 1 t ha^{-1} a permis d'atteindre des teneurs en protéines jusqu'à 25%. Sans pour autant tomber dans des situations aussi radicales, nous avons montré dans le cas des associations blé dur – pois d'hiver que plus la compétitivité du blé dur était élevée

moins la perte de rendement et donc l'augmentation de sa teneur en protéines étaient importantes. A contrario, plus la légumineuse est compétitive plus la perte de rendement du blé dur et donc l'accroissement de sa teneur en protéines seront importants. Dès lors, on comprend que c'est le rapport entre la compétition du blé dur et de la légumineuse, modifié par la fertilisation azotée, la densité et la structure du couvert qui va déterminer le rendement de chacune des deux espèces et donc l'amélioration ou non de la teneur en protéines de la céréale.

L'amélioration de la teneur en protéines du blé dur en association dépend également de la variété de blé dur. Plus la variété possède une teneur en protéines élevée en condition de culture monospécifique moins l'association n'aura d'intérêt pour en améliorer la qualité, et inversement. Pour autant, il ne suffit pas que le blé dur associé possède un niveau de protéines faible pour que l'association s'avère intéressante puisqu'il faut également que l'association se traduise par une diminution significative de la production du blé dur en association. Dès lors, plus la compétitivité du blé dur est faible plus sa teneur en protéines sera basse et plus l'augmentation de sa teneur en protéines en association sera forte. Nos résultats ont montré que la hauteur de paille, la biomasse des talles et le nombre des talles des cultivars sont des critères importants pour caractériser leur compétitivité (cf. **Chapitre IV, Partie II**). Un blé dur haut sera ainsi plus compétitif qu'un blé dur ayant une hauteur de paille faible (toutes choses égales par ailleurs), de même, des talles ayant une biomasse élevée seront plus compétitifs que des petits talles et enfin plus le nombre de talles produit est élevé et plus la compétitivité sera forte. On comprend que ces différents éléments ne sont pas nécessairement indépendants et que la compétitivité d'un cultivar dépend de ces trois éléments à la fois, en interaction avec la fertilisation azotée, la densité et la structure des couverts.

I.2 Les associations blé dur – légumineuse à graines améliorent l'utilisation de l'azote et de la lumière

I.2.1. A niveau de production identique les besoins en fertilisation azotée des associations sont réduits

Comme nous l'avons rappelé, la nutrition azotée des légumineuses en association repose essentiellement sur la fixation symbiotique, ce qui détermine le niveau de performance de l'association. En effet, dans le cas des associations blé dur – pois d'hiver nous avons montré (cf. **Chapitre III, Partie I**) que le rendement relatif (LER) augmentait avec le pourcentage de fixation de la légumineuse et de façon encore plus nette avec la quantité d'azote accumulée provenant de l'air. Cela indique qu'il ne suffit pas d'accroître la fixation symbiotique pour améliorer la performance quantitative des associations mais qu'il faut également assurer une production suffisante de la légumineuse. Or l'apport d'une fertilisation azotée, tout particulièrement de manière précoce (stade épi 1cm du blé dur), se traduit par : i) une diminution de la fixation symbiotique, ii) une diminution de la production de la biomasse et du rendement de la légumineuse et iii) un accroissement de la biomasse et du rendement du blé dur toutefois insuffisant pour compenser la baisse de production de la légumineuse. A contrario, un apport tardif (stade gonflement) ne réduirait pas le pourcentage de fixation symbiotique du pois d'hiver et n'aurait qu'un effet limité sur la production quantitative de la légumineuse alors qu'il permettrait d'améliorer significativement la production du blé dur et surtout sa teneur en protéines et sa qualité (faible niveau de mitadinage). Dès lors, il apparaît clairement que la performance de l'association vis-à-vis de l'azote s'explique par la complémentarité des deux espèces en dynamique pour l'utilisation des deux sources d'azote disponibles (azote de l'air et azote minéral du sol) dont on cherchera à optimiser l'utilisation.

I.2.2. Les associations réduisent le risque de lixiviation de nitrate par rapport aux légumineuses « pures »

Cette hypothèse n'a pas été vérifiée formellement mais de manière indirecte à travers l'analyse du reliquat azoté à la récolte. Cette mesure n'est qu'un indicateur du risque potentiel de lixiviation des ions nitrate car celui-ci dépend bien évidemment des conditions climatiques après la récolte mais également des pratiques culturales mise en place comme par exemple l'implantation ou non de culture intermédiaire piège à nitrate. La comparaison des reliquats d'azote minéral à la récolte entre les cultures « pures » de blé dur, de pois d'hiver, de féverole d'hiver et les associations ont montré que celui-ci était toujours supérieur après les cultures monospécifiques de légumineuses et inversement inférieur après les cultures de blé dur monospécifiques. Les reliquats observés après les associations ont quant à eux été toujours inférieurs à ceux des cultures « pures » de légumineuse et légèrement supérieurs ou identiques à ceux des cultures « pures » de blé dur. Ces résultats confirment donc que les associations pourraient permettre de réduire les risques de pertes de nitrate comparativement aux légumineuses. Par ailleurs, ces observations montrent que les associations semblent être des précédents culturaux légèrement meilleurs que le blé dur « pur » du point de vue du reliquat azoté, sous réserve toutefois que ce léger différentiel soit exploité correctement sans quoi cela représente autant d'azote perdu par le système.

Par ailleurs, on peut raisonnablement penser que les associations, dont les besoins en azote sont inférieurs aux cultures « pures » de blé dur, présenteraient des reliquats inférieurs comparativement aux pratiques classiques (conventionnelles) utilisant des quantités importantes d'engrais azoté. Cela met donc en évidence l'intérêt potentiel de ces systèmes du point de vue environnemental, et pas seulement du point de vue de l'économie d'intrants. A cela s'ajoute un arrière effet des associations, qui, en raison de pailles plus riches en azote pourraient permettre de libérer une quantité plus importante d'azote à la culture suivante par le biais de la minéralisation des résidus de culture. Ceci serait le cas à la fois par rapport au blé dur « pur » mais également en comparaison avec les légumineuses « pures » pour lesquelles la production de biomasse a été inférieure à celle des associations. Une analyse plus approfondie des dynamiques de minéralisation sur la culture suivante pourrait être intéressante à réaliser afin d'évaluer l'intérêt de l'introduction de tels mélanges à l'échelle du système de culture.

I.2.3. Les associations utilisent plus efficacement l'énergie lumineuse par la complémentarité spatiale et temporelle des espèces associées

La complémentarité des espèces s'exprime au niveau de l'utilisation des différentes sources d'azote mais également d'un point de vue de l'utilisation de l'énergie lumineuse notamment en hiver et début du printemps, comme nous l'avons mis en évidence dans le cas des associations blé dur – pois d'hiver (cf. **Chapitre IV, Partie I**). Cette complémentarité s'est traduite par une meilleure valorisation de l'énergie lumineuse sur l'ensemble du cycle comparativement aux cultures « pures », meilleure valorisation qui s'explique par une croissance décalée des deux espèces : le pois d'hiver se développant de façon plus tardive que le blé dur. La complémentarité de ces deux espèces pour l'utilisation de la lumière s'explique également par des architectures aériennes complémentaires qui permettent au système associé de mieux valoriser la ressource lumineuse dans l'espace à la fois verticalement et horizontalement. En effet, alors que l'interception de la lumière par le blé dur se fait essentiellement sur un axe vertical du fait de la forme et du port de ses feuilles, celle du pois d'hiver et de la féverole d'hiver se fait également sur un axe horizontal en raison du port moins érigé de leurs feuilles. A ces éléments s'ajoutent les différences de hauteur entre les

couverts : le blé dur étant plus haut que le pois d'hiver et la féverole d'hiver plus haute que le blé dur.

Dès lors, l'optimisation de l'énergie lumineuse par une meilleure captation du rayonnement photosynthétiquement actif tout au long de la croissance des espèces peut être améliorée par l'utilisation d'espèces ayant des cycles de croissance différenciées et des architectures aériennes complémentaires. Par ailleurs, nos résultats tendent à montrer que la complémentarité entre le blé dur et le pois d'hiver dépend fortement de la disponibilité en azote en lien avec la production de biomasse des deux espèces. En effet, la diminution de la production du pois d'hiver par l'apport d'azote en quantité importante et/ou de manière précoce réduit d'autant plus la performance de l'association pour l'utilisation de la lumière puisque cela tend à rapprocher l'association du fonctionnement d'une culture « pure » de blé dur. A contrario, un mélange homogène entre les deux espèces permettrait d'optimiser l'utilisation de l'énergie lumineuse à la fois dans le temps et dans l'espace augmentant de ce fait la performance de ces systèmes comparativement aux couverts monospécifiques. Un travail complémentaire doit donc être entrepris afin d'identifier d'une part les espèces et variétés à associer et d'autre part les densités, les structures de couvert et la fertilisation azotée pour optimiser l'usage de cette ressource ce qui serait d'ailleurs un moyen de lutte efficace contre les adventices en réduisant la quantité de lumière à leur disposition.

I.3 Les associations permettent de diminuer le recours aux pesticides

Les associations pourraient être un moyen de réduire les intrants de synthèse comme nous l'avons vu pour l'azote. Cela pourrait être également valable pour les pesticides (herbicides, insecticides et fongicides) si ces systèmes permettent plus ou moins de diminuer respectivement l'enherbement, les ravageurs et les maladies fongiques. L'évaluation de la performance des associations vis-à-vis des bio-agresseurs n'a été réalisée de manière approfondie que lors de la campagne 2007-2008 même si des résultats préliminaires similaires ont été obtenus en 2006-2007. Dès lors, il est délicat de conclure avec certitude sur ces éléments mais notre travail offre néanmoins des perspectives intéressantes.

I.3.1. Les associations limitent le développement des maladies fongiques par un effet barrière

Les associations ont permis, lors de la campagne 2007-2008, de réduire globalement la pression de la septoriose qui fut la maladie principale du blé dur. Cet effet positif s'expliquerait, comme nous l'avons vu (cf. **Chapitre V, Partie VII**) par un effet de « barrière physique » de la légumineuse. En effet, la légumineuse n'étant pas sensible à cette maladie, elle ne permet pas ou au moins réduit la propagation de la maladie lorsque les spores atterrissent sur cette plante non hôte. Il est apparu que cet effet était d'autant plus net que la production de biomasse de la légumineuse était importante et il semblerait que cela dépende également de la structure du couvert et plus précisément de l'agencement des plantes. En effet, pour des biomasses équivalentes, cet effet barrière serait plus important dans le cas de semis en ligne que dans le cas de mélanges sur le rang. En effet, les rangs de légumineuses intercalés entre ceux du blé dur dans les systèmes en ligne réduiraient fortement la diffusion de la maladie comparativement aux mélanges sur le rang où il existe une continuité entre les plantes de blé dur.

Des résultats comparables ont été mis en évidence dans le cas de l'anthracnose sur le pois d'hiver qui s'expliquerait là encore par un effet de « barrière » et/ou de modification positive du microclimat mais seulement lorsque la biomasse de la légumineuse n'est pas trop importante (ce qui n'est pas le cas notamment dans les mélanges additifs où la densité et la biomasse du pois d'hiver ont été fortement accrues). Dans le cas des associations blé dur – féverole d'hiver nous n'avons pas observé d'intérêt des associations pour réduire l'anthracnose ce qui peut être relié au fait que le blé dur est plus petit que la féverole d'hiver et donc n'aurait pas pu jouer un rôle de barrière sur la propagation de la maladie, ce d'autant plus que la biomasse du blé dur a été très faible lors de cet essai dans ce type d'association.

I.3.2. Les associations ont un effet limité sur les sitones

Nos résultats, basés sur les conclusions de l'essai 2007-2008, ont permis de mettre en évidence un effet positif des associations blé dur – pois d'hiver sur la réduction des attaques de sitones sur les nodosités du pois d'hiver comparativement aux cultures « pures » de cette légumineuse. En l'absence d'évaluation des dynamiques de colonisation et de quantification des populations de cet insecte nous ne pouvons tirer que des conclusions indirectes par : i) l'évaluation des dégâts sur les nodosités et ii) l'émergence des jeunes adultes. Il semble néanmoins que l'effet des associations blé dur – pois d'hiver soit lié à une dilution des ressources, qui rendrait la reconnaissance des plantes hôtes plus difficile que dans les couverts monospécifiques. Il s'agirait à la fois d'une dilution au sens strict du terme par une moindre quantité de biomasse disponible mais également par une modification de la forme, de la couleur et des odeurs qui « brouilleraient » les stimuli visuels et olfactifs permettant la « dissimulation » des plantes hôtes vis-à-vis de leurs ravageurs. Cette hypothèse reste à vérifier.

De tels effets n'ont pu être mis en évidence dans le cas de l'association blé dur – féverole d'hiver indiquant que le blé dur n'a pas eu d'influence sur la reconnaissance de la légumineuse ce qui se serait traduit par une concentration des ravageurs sur un niveau moindre de ressources. La différence avec le pois d'hiver peut s'expliquer par la conjonction d'au moins trois éléments, à savoir : i) la biomasse importante de la féverole d'hiver, ii) la hauteur de la légumineuse supérieure à celle du blé dur et iii) la faible biomasse de la céréale. Toutefois, en raison des différences fortes de nodulation de ces deux espèces la quantification seule du nombre de nodosités percées n'est certainement pas suffisante et il serait préférable à l'avenir de rapporter nos résultats à un nombre de nodosités ou à leur biomasse. Une autre solution serait d'évaluer l'effet des sitones sur la fixation symbiotique des légumineuses pour en comprendre les conséquences directes d'un point de vue agronomique. Cela pourrait être possible en utilisant comme référence des légumineuses fortement protégées chimiquement ou isolées physiquement. Ces différents résultats nous amènent à conclure que les associations semblent avoir un effet limité sur les sitones du fait certainement de leur forte mobilité, mais cela reste à confirmer dans le cadre d'un travail plus approfondi.

Par ailleurs, une évaluation de la préférence alimentaire des sitones envers les différentes légumineuses serait intéressante car nous avons observé que cet insecte avait attaqué en premier le pois d'hiver avant de consommer la féverole d'hiver. Ces attaques différenciées dans le temps peuvent être reliées à des décalages dans la maturité des deux espèces. Ceci est cohérent avec la diminution du nombre de nodosités actives et donc de nourriture pour les jeunes adultes sur le pois d'hiver avant que cela n'apparaisse sur la féverole d'hiver. L'émergence plus tardive des jeunes adultes sur la féverole d'hiver indique en tout cas clairement que les sitones ont commencé à pondre plus tardivement sur la féverole d'hiver suggérant un déplacement de ces dernières du pois d'hiver vers la féverole d'hiver. Ce résultat est à nuancer par le fait que nos parcelles expérimentales, de petite taille, permettent de tels déplacement ce qui ne serait peut-être pas le cas dans les conditions réelles à savoir sur de grandes parcelles.

I.3.3. Les associations réduisent les populations de pucerons du pois d'hiver

Sur la base des résultats de l'essai de 2007-2008, et ce en excellente cohérence avec des observations préliminaires faites en 2005-2006 et 2006-2007, nous pouvons affirmer que les associations sont un moyen efficace de réduire les populations de pucerons verts du pois d'hiver par rapport aux cultures « pures » de pois d'hiver, tout du moins dans le cas de niveaux d'infestation relativement faibles. Cet effet significatif des associations s'expliquerait par une dilution des ressources qui rendrait la reconnaissance du pois d'hiver plus difficile dans les couverts plurispécifiques, mais ceci uniquement lorsque cet insecte se serait posé sur une plante. En effet, à la différence du sitone qui est capable de reconnaître sa plante hôte à « longue » distance, le puceron est quant à lui essentiellement transporté par les courants d'air et tombe aléatoirement sur les couverts. Cela met d'ailleurs en évidence l'importance de prendre en compte les différents mécanismes de colonisation selon les ravageurs.

Dans les associations, la distance moyenne à parcourir entre deux plantes hôtes est augmentée comparativement aux couverts monospécifiques. Cela se traduit dans un premier temps par une dépense énergétique supplémentaire pour aller d'une plante de pois d'hiver à une autre puis par une réduction de la capacité de reproduction du puceron et donc du développement des colonies. La dilution des ressources joue alors le rôle de « barrière physique » à la progression du ravageur à laquelle s'ajoute une modification de l'aspect général du couvert (forme, couleur, odeur et microclimat) rendant la reconnaissance de la plante hôte plus difficile et l'installation dans le couvert moins favorable.

I.3.4. Les associations réduisent l'enherbement comparativement au pois d'hiver « pur » mais pas vis-à-vis de la féverole d'hiver « pure »

Nos résultats indiquent clairement que la quantité de mauvaises herbes dans l'association blé dur – pois d'hiver est déterminée par la quantité de blé dur et non pas par la biomasse totale de l'association ou son taux de couverture global. Le fait que la présence et la biomasse du blé dur dans l'association blé dur – pois d'hiver déterminent la production d'adventices est d'ailleurs cohérent avec l'augmentation de la biomasse des adventices dans les associations additives blé dur – pois d'hiver où le pois a été semé à la même densité qu'en culture « pure ». Par contre, l'association ne permettrait pas de réduire l'enherbement global vis-à-vis du blé dur monospécifique, sauf peut-être pour certaines espèces d'adventices ce qui là encore mériterait un travail plus approfondi intégrant l'étude précise des différentes espèces d'adventices. Ce résultat est néanmoins des plus intéressants pour la production de pois d'hiver qui est une culture peu compétitive et dont la production peut être fortement réduite par les adventices car le désherbage mécanique est difficile. En effet, les interventions mécaniques ne peuvent avoir lieu que dans les stades précoces à savoir avant la fermeture du couvert par les vrilles foliaires. Cela est d'autant plus difficile dans le cas des cultures d'hiver que les fenêtres climatiques permettant l'accès des engins agricoles aux parcelles sont relativement limitées. Dans l'association blé dur – féverole d'hiver la quantité d'adventices semble avoir été réduite comparativement aux cultures « pures » de blé dur, ce qui traduit un effet de la féverole d'hiver sur le contrôle des adventices en lien avec sa biomasse élevée. Dans tous les cas, qu'il s'agisse du blé dur dans les associations blé dur – pois d'hiver ou de la féverole d'hiver dans les associations blé dur –féverole d'hiver, le contrôle des adventices passe par une diminution de la quantité de lumière, d'eau et de minéraux disponibles pour ces dernières.

II. Conclusion générale : Que retenir des associations de blé dur et de légumineuse à graines ?

L'association du blé dur avec des légumineuses à graines telles que le pois d'hiver et la féverole d'hiver présente de nombreux intérêts agronomiques, comme nous l'avons montré dans ce travail de thèse et ceci tout particulièrement dans les systèmes à bas niveaux d'intrants azotés où la production de blé dur de qualité technologique suffisante est relativement difficile à atteindre. Nos résultats ont cependant montré que ces systèmes ne sont pas, en l'état actuel des choses, économiquement les plus performants. Pour autant, la mise en place d'une politique agricole adaptée – notamment via des primes favorables à ces cultures – pourrait permettre de les rendre doublement performants en réduisant le recours aux intrants de synthèse.

Le soutien économique des associations d'espèces est cohérent avec le fait que ces systèmes s'inscrivent pleinement dans le Plan "Agriculture biologique : horizon 2012"[1] qui vise à : i) accroître les surfaces en agriculture biologique à hauteur de 6% de la surface agricole utile en 2012, ii) aider à la structuration de la filière, iii) accorder un effort prioritaire en recherche, développement et formation, iv) favoriser une adaptation de la réglementation et v) faciliter la conversion et la pérennité des exploitations en agriculture biologique. Cela est également cohérent avec le rôle que ces systèmes pourraient jouer dans le cadre du plan « Ecophyto 2018 »[2] qui vise à : i) diffuser le plus largement possible auprès des agriculteurs les pratiques connues, économes en produits phytosanitaires, ii) dynamiser la recherche sur les cultures économes en pesticides et d'en diffuser largement les résultats et iii) renforcer, par la formation, la compétence de l'ensemble des acteurs de la chaîne pour réduire et sécuriser l'usage des produits phytosanitaires. Enfin, bien que notre étude se soit plutôt focalisée sur l'intérêt des associations pour produire du blé dur de qualité, ces systèmes pourraient être aussi dédiés à la production de légumineuses. Ceci est un enjeu majeur en Europe où les surfaces cultivées en protéagineux ne cessent de diminuer justifiant la mise en place dès 2010 d'une aide supplémentaire aux protéagineux pour réduire le déficit européen en protéines végétales. Le constat est le même en ce qui concerne la production biologique alors que les légumineuses devraient théoriquement constituer un pilier des rotations céréalières.

Il est par conséquent raisonnable de penser que si aujourd'hui les associations ne peuvent pas, en théorie, bénéficier des aides couplées (ce qui les rend de fait peu performantes économiquement par rapport aux cultures « pures » de blé dur) elles devraient demain pouvoir profiter d'aides substantielles dans le cadre de la nouvelle politique agricole qui vise à développer les systèmes bas-intrants. Il reste cependant à confirmer et à approfondir les résultats de nos travaux, notamment la conception d'itinéraires techniques performants mais aussi leur insertion dans les systèmes de cultures. Il faudra également convaincre les principaux acteurs de la filière grandes cultures : les agriculteurs bien sûr mais aussi et surtout les organismes stockeurs et collecteurs qui doivent satisfaire aux exigences des transformateurs en termes de qualité, notamment du point de vue des impuretés. Toutefois, si la performance des associations se vérifie et s'il existe une réelle volonté de développer une agriculture économe en intrants alors il ne fait pas de doute que ces freins seront rapidement levés par la mise en œuvre d'une politique et de moyens adaptés.

[1] http://agriculture.gouv.fr/sections/magazine/focus/plan-agriculture/plan-agriculture8529
[2] http://agriculture.gouv.fr/sections/magazine/focus/phyto-2018-plan-pour/#planECOPHYTO2018

III. Perspectives et thématiques de recherche à développer pour la conception d'itinéraires techniques adaptés aux associations

III.1 Quelles perspectives de recherche à approfondir ?

III.1.1. Le rôle des variétés

Notre travail s'est focalisé sur les associations blé dur – pois d'hiver et blé dur – féverole d'hiver et a permis de mettre en évidence l'importance du choix variétal de blé dur sur la performance et le fonctionnement des associations notamment dans le cas des mélanges blé dur – pois d'hiver. Par contre, cet effet n'a pas pu être analysé correctement dans le cas des mélanges avec la féverole d'hiver en raison de la très forte densité de semis de la légumineuse dans l'essai 2006-2007. Ainsi, nous pensons qu'une évaluation approfondie des aspects variétaux mériterait d'être réalisée en utilisant une gamme élargie de cultivars présentant notamment des différences en termes de précocité et de hauteur de paille. Une attention particulière devra être accordée à l'étude des stades précoces de croissance qui semblent déterminer fortement la performance finale des associations à la fois quantitative et qualitative. La précocité pourrait d'ailleurs s'avérer être un facteur déterminant que nous n'avons pas pu analyser de manière approfondie dans nos essais en raison de la faible variabilité des cultivars de blé dur sur ce critère. Néanmoins, en lien avec la croissance plus tardive du pois d'hiver, il est raisonnable de penser qu'un blé dur très précoce sera plus compétitif (toutes choses égales par ailleurs) qu'un blé dur tardif tallant peu. Toutefois, nous avons déjà exploré une grande partie de la gamme disponible du blé dur dont la base génétique est étroite (D. Desclaux, comm. pers.) si bien que des perspectives intéressantes sont peut-être à rechercher du côté des variétés de légumineuses. Ces nouvelles études devraient aider dans la compréhension du rôle des traits variétaux et permettre d'identifier ceux qui sont les mieux adaptés pour la culture en association. Enfin, cela offrirait des perspectives en termes de sélection variétale car les critères de sélection utilisés en culture « pure » ne sont probablement pas totalement adaptés pour les associations, qui plus est, pour les systèmes à bas niveaux d'intrants.

III.1.2. Le rôle de la structure du couvert et des densités

La structure des couverts (en rang monospécifique ou en mélange sur le rang) et les densités des espèces associées sont des éléments clés de la performance des associations dont les choix dépendent fortement des objectifs de production et notamment de la proportion finale de chaque espèce que l'on cherche à obtenir. Un travail est donc nécessaire pour comprendre avec précision le partage des ressources (lumière, eau, azote) en fonction de la structure des couverts et des densités de plantes. Ce travail devrait ainsi permettre de proposer des itinéraires techniques plus adaptés en minimisant notamment les coûts liés au semis. Il est raisonnable de penser que des résultats comparables aux mélanges en lignes (en termes de production de chaque espèce) pourraient être obtenus en mélanges en « vrac » (mélange des espèces sur le rang) en augmentant la densité du pois d'hiver et/ou en diminuant celle du blé dur. Cela permettrait de semer les associations en un seul passage – et non plus deux – comme dans le cas des mélanges en ligne. Par ailleurs, le raisonnement simultané de la densité et de la structure des associations devrait permettre de réduire les risques d'une compétition trop forte d'une espèce sur l'autre en particulier de la féverole d'hiver sur le blé dur lorsque la densité de la légumineuse est mal maîtrisée. En effet, un semis trop dense de la féverole d'hiver dans un semis en ligne se traduirait avant tout par un accroissement des compétitions

intraspécifiques (de la féverole d'hiver sur elle-même). Ainsi, à densité équivalente de féverole d'hiver, plus la distance entre les rangs de féverole d'hiver est grande, plus le nombre de plantes sur le rang est augmenté. Dans le cas des mélanges blé dur – pois d'hiver on cherchera au contraire à diminuer l'effet des compétitions interspécifiques (du blé dur sur le pois d'hiver) ce qui pourrait être obtenu par des mélanges en ligne moins défavorables au pois d'hiver que ne le sont les mélanges en « vrac ».

III.1.3. Les associations et les bio-agresseurs

Les aspects bio-agresseurs (maladies, ravageurs et adventices) ont été abordés de manière partielle dans ce travail en ne considérant que les résultats d'une campagne d'expérimentation. Or, la pression des facteurs biotiques dépend fortement des conditions pédo-climatiques et de l'histoire culturale de la parcelle. Il est donc délicat de généraliser les résultats d'une année d'essai à d'autres situations. En conséquence, nous pensons que l'étude de la performance des associations blé dur – légumineuse à graines vis-à-vis des bio-agresseurs mérite d'être approfondie car cet aspect est essentiel en système à bas niveau d'intrants. Cela nécessite donc de prendre en considération différents contextes pédo-climatiques et d'utiliser un protocole adapté avec notamment des parcelles de plus grande taille. Par ailleurs, il serait utile d'évaluer l'effet des associations sur la culture suivante, que ce soit du blé dur ou une légumineuse à graines en étudiant le rôle des résidus de culture sur la propagation des maladies. Enfin, une comparaison du microclimat dans le couvert entre des parcelles d'association et de cultures « pures » serait utile pour aider à la compréhension de la propagation différenciée des maladies dans ces couverts. En effet, il est probable que les associations réduisent dans certaines conditions la circulation de l'air et de la vapeur d'eau comparativement aux couverts monospécifiques de blé dur. Cela pourrait être aussi bien positif que négatif selon les niveaux de production de biomasse, la structure des couverts, les niveaux de disponibilité en azote, les hauteurs des couverts et la sensibilité des variétés utilisées.

De même, une étude des modes de reconnaissance des associations par les ravageurs et les auxiliaires de cultures pourrait permettre d'identifier les principaux mécanismes mis en jeu et aider ainsi à la conception d'itinéraires techniques adaptés à la lutte intégrée. Il serait donc nécessaire de mener un travail approfondi pour connaître avec précision : i) les mécanismes de colonisation dans les différents couverts et ii) le nombre d'individus présents dans le milieu. Par ailleurs, une évaluation de la préférence alimentaire des sitones envers les différentes légumineuses serait intéressante car nous avons observé que cet insecte avait attaqué en premier le pois d'hiver avant de consommer la féverole d'hiver. Si de tels résultats venaient à être confirmés à une échelle spatiale supérieure nous pourrions imaginer l'utilisation des féveroles d'hiver comme « catch crop » pour piéger les sitones en bordure des parcelles de pois d'hiver de façon à réduire leur impact sur la fixation symbiotique du pois d'hiver. Dans le prolongement de cette idée, on pourrait imaginer d'implanter des bandes de pois d'hiver en bordure des parcelles de féverole d'hiver dans ce qu'on appelle des « killing zones ». Le but serait alors de concentrer les sitones en début de cycle sur ces zones qui seraient ensuite traitées permettant ainsi de réduire la population de sitones et donc les conséquences sur la fixation symbiotique de la féverole d'hiver. Cela présenterait également l'avantage de réduire la surface à traiter et donc les potentielles nuisances environnementales.

Le rôle des auxiliaires des cultures, notamment les syrphes et les coccinelles, n'a pas été évalué alors même qu'il s'agit là de facteurs de régulation importants des populations de pucerons, dont l'efficacité pourrait être accrue dans le cas des couverts plurispécifiques du fait de la réduction des populations de ravageurs et de leur dynamique mais aussi du fait de l'augmentation du nombre d'espèces d'auxiliaires ayant des régimes alimentaires et des stratégies de prédation complémentaires. Là encore, un travail approfondi mériterait d'être réalisé et ceci de façon à concevoir des systèmes pour favoriser les auxiliaires de cultures en

introduisant par exemple des espèces secondaires, c'est-à-dire faiblement compétitives pour ne pas affecter la production des associations mais permettant l'installation d'auxiliaires de culture.

III.1.4. Les associations blé dur – féverole d'hiver et l'azote

L'azote est un élément essentiel de la performance des associations blé dur – pois d'hiver dont le rôle n'a pu être analysé dans le cas des associations du blé dur avec la féverole d'hiver. Pourtant l'azote joue certainement un rôle tout aussi important dans ces mélanges mais cela mériterait d'être vérifié en s'affranchissant des aspects de densités. Il s'agira donc, d'évaluer l'effet de la disponibilité dynamique de l'azote de façon à optimiser l'utilisation de cette ressource et ceci en interaction avec la fixation symbiotique de la légumineuse.

III.2 Quelles perspectives de recherche à développer ?

Au-delà des perspectives de recherche qu'il serait intéressant d'approfondir suite au travail que nous avons réalisé sur les associations blé dur – pois d'hiver et blé dur – féverole d'hiver, d'autres thématiques nouvelles doivent être évaluées dont nous présenterons ci-après des propositions non exhaustives.

III.2.1. Quelles autres espèces à associer ?

Si les aspects variétaux jouent – comme nous l'avons montré – un rôle important dans le fonctionnement et la performance des associations, le choix des espèces à associer est déterminant.

Si l'objectif était de produire des légumineuses, il est probable que le blé dur ne soit pas l'espèce la mieux adaptée et il serait utile de tester d'autres céréales comme par exemple le blé tendre ou le triticale. D'autre part, nous avons expérimenté de façon préliminaire quelques micro-parcelles en associant du blé dur avec du pois chiche « d'hiver » (à grains noirs de type « Dési ») qui ont montré que cette légumineuse était faiblement compétitive et donc ne permettait pas d'améliorer la qualité du blé dur. Toutefois, ces expérimentations mériteraient d'être approfondies en adaptant la structure du couvert ou en testant un système de culture dérobée permettant de récolter successivement les deux espèces (la maturité du pois chiche pouvant survenir un mois après celle du blé dur). La production du pois chiche pourrait être intéressante puisqu'il s'agit d'une production présentant une bonne valorisation économique mais qui est difficile à réaliser en culture « pure » en raison de sa sensibilité à l'anthracnose (spécifique du pois chiche) mais dont la pression pourrait être réduite dans le cas des associations.

Il existe une infinité de combinaisons possibles entre céréales et légumineuses et le travail d'analyse du fonctionnement de ces couverts que nous avons réalisé pourrait servir de guide à la conception de nouveaux mélanges en fonction des objectifs recherchés.

III.2.2. Les associations et la faisabilité technique

La culture des associations ne présente pas, *a priori*, de difficultés majeures si ce n'est du point de vue du désherbage, de la récolte et du tri des graines.

Nous pensons qu'il est important d'évaluer plus en détails les possibilités de désherbage mécanique des associations qui pose un certain nombre de difficultés quant aux dates d'intervention et aux réglages de la vitesse et de l'agressivité de la herse étrille. Quant au désherbage chimique le problème est malheureusement plus simple : à savoir qu'il n'y a pas de produit homologué autorisé en végétation agissant à la fois sur le blé dur et sur les légumineuses. Une analyse fréquentielle climatique et de portance du sol et en considérant les

stades physiologiques des plantes permettrait de déterminer le nombre de jours où il est possible de réaliser un désherbage mécanique à la herse étrille comparativement aux cultures « pures ». Par ailleurs, il pourrait être intéressant d'évaluer plus en avant l'effet des cultures associées sur l'enherbement qui dépend fortement des conditions climatiques et de l'histoire culturale. En effet, l'impact des adventices sur le rendement des cultures ne dépend pas uniquement de la biomasse mais également des espèces (espèces associées et espèces d'adventices) en lien avec leurs dynamiques de croissance et leur capacité à puiser les éléments minéraux du sol. Une telle évaluation pourrait être réalisée via un enherbement artificiel, à savoir en semant les adventices avec le mélange et ceci de façon à tester différents niveaux de pression d'adventices et différentes espèces.

Par ailleurs, si le tri des grains à la récolte ne pose globalement pas de difficultés particulières lorsque les grains sont entiers, cela n'est pas le cas lorsque le mélange présente une quantité importante de fragments de légumineuse difficilement séparables du blé dur. Or, cette quantité d'impuretés dépend des réglages de la moissonneuse-batteuse et des conditions de la récolte (maturité et humidité des grains). Par conséquent nous pensons qu'un travail spécifique doit être réalisé sur la faisabilité technique de la récolte lorsqu'on souhaite valoriser le blé dur pour l'alimentation humaine. Nos premières observations tendent à montrer qu'il est possible de récolter les associations sans trop casser les grains de légumineuse tout en séparant correctement les grains des glumes et rachis du blé dur. Pour autant, une évaluation précise et quantifiée des pertes à la récolte doit être entreprise en considérant du matériel agricole et pas uniquement des moissonneuses-batteuses expérimentales comme celles utilisées dans nos essais. Cette question est au cœur des préoccupations des agriculteurs, des coopératives et des transformateurs et il est donc nécessaire de l'évaluer correctement par un travail plus technique en vue de la promotion du développement de ce type de cultures.

III.2.3. Les associations et les autres éléments majeurs P et K

Le phosphore et le potassium contenus dans les engrais minéraux sont d'origine fossile et deviendront à terme (horizon 40 ans pour le phosphore, Griffon 2006) des ressources coûteuses et donc limitantes de la production agricole dans la mesure où elles ne sont pas renouvelables. Il est donc important d'évaluer le rôle de ces éléments dans les cultures associées. C'est un enjeu particulier dans le cas des légumineuses dont les besoins en phosphore sont importants pour la fixation symbiotique. Or, le taux de fixation des légumineuses dans les associations étant augmenté, le phosphore pourrait être encore plus limitant dans les mélanges d'espèces que dans les cultures « pures » de légumineuses sauf si des phénomènes de facilitation se produisent avec une intensité significative. En effet, la libération de protons par l'activité fixatrice pourrait permettre d'augmenter la disponibilité du phosphore pour le blé dur. Des travaux sont actuellement en cours dans le cadre du projet ANR Systerra Perfcom (coordonné par P. Hinsinger, INRA Montpellier).

III.2.4. Les associations et la variabilité interannuelle

Nos essais n'avaient pas pour objectif de répondre à l'hypothèse selon laquelle les associations permettraient de réduire la variabilité interannuelle du point de vue de la production quantitative et qualitative, voire économique. En effet, nos expérimentations ont été différentes lors des trois campagnes aussi bien en termes de variétés que de densités et de disponibilités en azote. Ce point mériterait d'être évalué puisqu'il s'agit là d'un facteur de décision important pour les agriculteurs et ceci selon leur aversion au risque. L'évaluation de la variabilité interannuelle est délicate par la simple expérimentation, ce qui montre une des limites des essais *in situ* mais cela pourrait être envisageable par le biais de la modélisation.

III.2.5. La modélisation pour aider à la conception d'itinéraires techniques

La modélisation des cultures associées pourrait présenter de nombreux atouts afin d'évaluer leur performance et leur fonctionnement dans des contextes pédo-climatiques contrastés. Par ailleurs, la modélisation pourrait permettre de valider ou non l'hypothèse sus-citée de la moindre variabilité interannuelle de ces systèmes et elle serait également un moyen d'aider à la détermination des traits variétaux les mieux adaptés pour les cultures associées.

Cependant, la conception d'un modèle de culture adapté aux cultures associées nécessite au préalable de : i) formaliser le fonctionnement de ces systèmes, ii) adapter le formalisme des modèles de cultures actuels ou d'en développer de nouveaux afin de représenter correctement les compétitions inter- et intraspécifiques, iii) paramétrer les modèles de cultures à partir des données recueillies dans différents contextes pédo-climatiques et en considérant différentes variétés et espèces pour ensuite iv) valider le modèle et l'utiliser comme un outil d'aide à la décision ou d'aide à la conception d'itinéraires techniques en intégrant un modèle d'analyse multicritères.

III.2.6. Quelle place pour les associations dans les systèmes de culture ?

L'évaluation agronomique des associations blé dur – pois d'hiver et blé dur – féverole d'hiver que nous avons réalisée s'est placée à l'échelle de l'itinéraire technique. Il restera à élargir ce travail au niveau du système de culture ce qui pose la question cruciale de la place des mélanges plurispécifiques dans les systèmes de culture, à savoir : i) ces systèmes sont-ils viables à long terme ? ii) peut-on cultiver des associations deux années de suite ? iii) peut-on cultiver du blé dur ou une légumineuse en culture « pure » après une association ?

En l'état actuel de nos connaissances nous ne disposons pas des informations nécessaires pour répondre de manière fondée à ces questions mais l'on peut penser que les associations sélectionneraient à la fois les ravageurs, maladies et adventices des deux espèces rendant ainsi leur introduction dans les systèmes de culture délicate. On peut au contraire supposer que les associations, en réduisant la pression des maladies, de certains ravageurs et l'enherbement, pourraient s'insérer dans les systèmes de culture en lieu et place du blé dur et/ou des légumineuses. La réponse à ces questions dépend de nombreux facteurs comme les conditions pédo-climatiques ou le type de rotation et dès lors il n'est pas possible d'apporter une réponse générique. En tout état de cause, cela montre que l'étude des itinéraires techniques est une étape nécessaire pour évaluer la performance agronomique de ces systèmes innovants mais non suffisante puisqu'il faut ensuite pouvoir déterminer leur place dans les systèmes de culture.

REFERENCES 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

AGRESTE (2008) Statistique agricole annuelle provisoire - Région Midi-Pyrénées. Ministère français de l'agriculture et de la pêche. http://agreste.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/R7308A03.pdf. Accessed 18 Dec 2008

Allen L, Sinclair T, Lemon E (1977) Radiation and microclimate relationships in multiple cropping systems. Stelly, M. (Editor-in-Chief): Multiple cropping. ASA Special Publication Number 27:171-200

Altieri M (1999) The ecological role of biodiversity in agroecosystems. Agric. Ecosyst. Environ. 74:19-31

Altieri M, Francis C, Schoonhoven A, Doll J. (1978) A review of insect prevalence in maize (Zea mays L.) and bean (Phaseolus vulgaris L.) polycultural systems. Field Crops Res. 1:33-49

Altieri M, Nicholls D (2004) Biodiversity and pest management in agroecosystems. Haworth Press, Binghanton

Amarger N, Mariotti A, Mariotti F, Durr J, Bourguignon C, Lagacherie B (1979) Estimate of symbiotically fixed nitrogen in field grown soybeans using variations in ^{15}N Natural abundance. Plant Soil 52:269-280

Andersen M K, Hauggaard-Nielsen H, Ambus P, Jensen E S (2004) Biomass production, symbiotic nitrogen fixation and inorganic N use in dual and tri-component annual intercrops. Plant Soil 266:273-287

Anil L, Park J, Phipps R H, Miller F A (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

Auger J, Dugravot S, Naudin A, Ahmed A, Pierre D, Thibout E (2002) Potential of Allium allelochemicals for safe insect control. IOBC Bulletin 25:295-307

Baliddawa C (1984) Movement and feeding activity of adult pea leaf weevil, Sitona lineatus L. in an oat-broadbean diculture. Insect Sc. Appl. 5:33-39

Banik P (1996) Evaluation of wheat (T. aestivum) and legume intercropping under 1:1 and 2:1 row-replacement series system. J. Agron. Crop. Sci. 176:289-294.

Bannon F J, Cooke B M (1998) Studies on dispersal of Septoria tritici pycnidiospores in wheat – clover intercrops. Plant Pathology 47:49-56.

Baumann D, Bastiaans L, Kropff M (2002) Intercropping system optimization for yield, quality, and weed suppression combining mechanistic and descriptive models. Agronomy J. 94:734-742

Bedoussac L, Justes E (2009) 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 DOI 10.1007/s11104-009-0082-2

Bedoussac L, Justes E (Submitted) Species dynamics, competition and complementarity for light and N use in a durum wheat – winter pea intercrop are determined by nitrogen availability. Plant Soil

Bellostas N, Hauggaard-Nielsen H, Andersen M, Jensen E (2003) Early interference dynamics in intercrops of pea, barley and oilseed rape. Biol. Agric. Hort. 21:337-348

Berntsen J, Hauggaard-Nielsen H, Olesen J E, Petersen B M, Jensen E S, Thomsen A (2004) Modelling dry matter production and resource use in intercrops of pea and barley. Field Crops Res. 88:69-83

Biscoe P V, Gallagher J (1977) Weather, dry matter production and yield. Environmental effects on crop physiology. Proceedings of a symposium held at Long Ashton Research Station, University of Bristol 13-16 April 1975, pp 75-100

Brennan R M, Fitt B D L, Taylo G S, Colhoun J (1985) Dispersal of Septoria nodorum pycnidiospores by simulated rain and wind. J Phytopathology 112:291-297

Brisson N, Launay M, Mary B, Beaudoin N (2008) Conceptual basis, formalisations and parameterization of the STICS crop model. Quae, Versailles

Brophy L, Heichel G (1989) Nitrogen release from roots of alfalfa and soybean grown in sand culture. Plant Soil 116:77-84

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 R M (1987) Plant architecture and ressource competition. Ecological studies 61:164-179

Cantot P (1986) Estimation of the adult and larval population of Sitona lineatus in pea crops and of attacks by them. Agronomie 6:481-486

Cantot P, Papineau J (1983) Discrimination of lupin with low alkaloid content by adult Sitona lineatus L. (Col. Curculionidae). Agronomie 3:937-940

Carr P M, Martin G B, Caton J S, Poland W (1998) Forage and nitrogen yield of barley-pea and oat-pea intercrops. Agronomy J. 90:79-84

Cenpukdee U, Fukai S (1992) Cassava/legume intercropping with contrasting cassava cultivars. 1. Competition between component crops under three intercropping conditions. Field Crops Res. 29:113-133

Cenpukdee U, Fukai S (1992) 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

Chen Y, Yu S, Yu Z (2003) Relationship between amount or distribution of PAR interception and grain output of wheat communities. Acta Agronomica Sinica 29:730-734

Connolly J (1987) On the use of response models in mixture experiments. Oecologia 72:95-103

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

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, Crozat Y (2004) N2 fixation and N supply in organic pea (Pisum sativum L.) cropping systems as affected by weeds and peaweevil (Sitona lineatus L.). Eur. J. Agron. 22:449-458

Corre-Hellou G, Crozat Y (2005) Assessment of root system dynamics of species grown in mixtures under field conditions using herbicide injection and N-15 natural abundance methods: A case study with pea, barley and mustard. Plant Soil 276:177-192

Courbon J C (1982) Processus de décision et aide à la décision. Economies et sociétés. Série sciences de la gestion, tome XVI, 12:1456-1476

Cox G, Atkins M (1979) Agricultural ecology. An analysis of world food production systems. Freeman; San Francisco.

Crookston R, Treharne K, Ludford P, Ozbun J (1975) Response of beans to shading. Crop Sci. 15:412-416

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

Cruz P, Soussana J F (1997) Mixed crops. In: Lemaire G (ed) Diagnosis of the nitrogen status in crops. Springer, Berlin, pp 131-144

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

Dalal R C (1974) Effects of intercropping maize with pigeon peas on grain yield and nutrient uptake. Exp. Agric. 10:219-224

Davis J H C, Woolley J N (1993) Genotypic requirement for intercropping. Field Crops Res. 34:407-430

De Wit C T (1960) On competition. Verslagen Van Landbouwkundige Onderzoekingen 66:1-82

De Wit C T, Van Den Bergh J P (1965) Competition between herbage plants. Neth. J. Agric. Sci. 13:212-221

Dhima K V, Lithourgidis A S, Vasilakoglou I B, Dordas C A (2007) Competition indices of common vetch and cereal intercrops in two seeding ratio. Field Crops Res. 100:249-256

Dore T, Meynard J M (1995) On-farm analysis of attacks by the pea weevil (Sitona lineatus L.; Co., Curculionidae) and the resulting damage to pea (Pisum sativum L.) crops. J. appl. entomol. 119:49-54

Dray S, Dufour A B, Chessel D (2007) The ade4 package - II: Two-table and K-table methods. R News 7:47-52

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

Evans L (1998) Feeding the ten billion: plants and population growth. Feeding the ten billion: plants and population growth. Cambridge University Press, Cambridge

Favereau O (1982) La RCB entre deux paradigmes. Bulletin de la RCB 51

Fenandez-Aparicio M, Sillero J, Rubiales D (2007) Intercropping with cereals reduces infection by Orobanche crenata in legumes. Crop Protection 26:1166-1172

Finch S, Collier R H (2000) Host-plant selection by insects - a theory based on 'appropriate/inapporopriate landings' by pest insects of cruciferous plants. Entomologia Experimentalis Applicata 96:91-102

Finch S, Kienegger M (1997) A behavioural study to help clarify how undersowing with clover affects host-plant selection by pest insects of brasica crops. Entomologia Experimentalis Applicata 84:165-172

Fisher R A, Yates F (1938) Statistical tables for biological, agricultural and medical research. Oliver and Boyd, Edinburg

Fujita K, Ofosubudu K G, Ogata S (1992) Biological nitrogen fixation in mixed legume-cereal cropping systems. Plant Soil 141:155-175

Fukai S (1993) Intercropping - Bases of productivity - Introduction. Field Crops Res. 34:239-245

Fukai S, Trenbath B (1993) Processes determining intercrop productivity and yields of component crops. Field Crops Res. 34:247-271

Garrido-Lestache E, López-bellido R J, 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

Gastal F, Lemaire G (1988) Study of a tall fescue sward grown under nitrogen deficiency conditions. Proceedings of the 12th General Meeting of the European Grassland Federation, Dublin, Ireland, July 4-7, 1988, pp. 323-327

Gastal F, Belanger G, Lemaire G (1992) A model of leaf extension rate of tall fescue in response to nitrogen and temperature. Ann. Bot. 70:437-442

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

Gate P (1995) Ecophysiologie du blé de la plante à la culture. Lavoisier, Paris

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

GNIS (2009) Avez-vous analysé tous les éléments liés au poste semence ? http://www.gnis.fr/images/documents/D0692.pdf. Accessed 10 Août. 2009

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

Gosse G, Varlet-Grancher C, Bonhomme R, Chartier M, (1986) Maximum dry matter production and solar radiation intercepted by a canopy. Agronomie 6:47-56

Gremillon C (1969) Vers une nouvelle théorie de la décision. Sociologie du travail. 4:463-471

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

Griffon M (2007) Pour des agricultures écologiquement intensives des territoires à haute valeur environnementale et de nouvelles politiques agricoles. Les leçons inaugurales du Groupe ESA. Groupe ESA, Angers

Guilioni L, Lecoeur J (2005) Acquisition du carbone à l'échelle du peuplement. In: Agrophysiologie du pois protéagineux. INRA-ARVALIS-UNIP-ENSAM, Paris, pp 65-80

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

Hang A, McCloud D, Boote K, Duncan W (1984) Shade effects on growth, partitioning, and yield components of peanuts. Crop Sci. 24:109-115

Hauggaard-Nielsen H, Ambus P, Jensen E S (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

Hauggaard-Nielsen H, Ambus P, Jensen E S (2001b) Interspecific competition, N use and interference with weeds in pea-barley intercropping. Field Crops Res. 70:101-109

Hauggaard-Nielsen H, Ambus P, Jensen E S (2003) The comparison of nitrogen use and leaching in sole cropped versus intercropped pea and barley. Nutr. Cycl. Agroecosyst. 65:289-300

Hauggaard-Nielsen H, Andersen M K, Jørnsgaard B, Jensen E S (2006) Density and relative frequency effects on competitive interactions and resource use in pea-barley intercrops. Field Crops Res. 95:256-267

Hauggaard-Nielsen H, Jensen E S (2001) Evaluating pea and barley cultivars for complementarity in intercropping at different levels of soil N availability. Field Crops Res. 72:185-196

Hauggaard-Nielsen H, Jensen E (2005) Facilitative root interactions in intercrops. Plant Soil 274:237-250

Hinsinger P (2001) Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: a review. Plant Soil 237:173-195

Hodges T, Kanemasu E T (1977) Modeling daily dry-matter production of winter-wheat. Agron J. 69:974-978

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

Jacquard P (1968) Manifestation et nature des relations sociales chez les végétaux supérieurs. Oecologia Plantarum 3:137-168.

Jahansooz M R, Yunusa I A M, Coventry D R, Palmer A R, Eamus D (2007) Radiation- and water-use associated with growth and yields of wheat and chickpea in sole and mixed crops. Eur. J. Agron. 26:275-282

Jensen E (1996) Grain yield, symbiotic N_2 fixation and interspecific competition for inorganic N in pea-barley intercrops. Plant Soil 182:25-38

Jeuffroy M H, Bouchard C (1999) Intensity and duration of nitrogen deficiency on wheat grain number. Crop Sci. 39:1385-1393

Johansen A, Jensen E (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

Justes E, Denoroy P, Gabrielle B, Gosse G (2000) Effect of crop nitrogen status and temperature on the radiation use efficiency of winter oilseed rape. Eur. J. Agron. 13:165-177

Justes E, Mary B, Meynard J, Machet J, Thelier-Huche L (1994) Determination of a critical nitrogen dilution curve for winter wheat crops. Ann. Bot. 74:397-407

Justes E, Mary B, Nicolardot B (2009) Quantifying and modelling C and N mineralization kinetics of catch crop residues in soil: parameterization of the residue decomposition module of STICS model for mature and non mature residues. Plant Soil. Doi:10.1007/s1110400999664

Khan W D F, Peoples M B, Herridge D F (2002) Quantifying below-ground nitrogen of legumes - 1. Optimising procedures for N-15 shoot-labelling. Plant Soil 245:327-334

Khan D F, Peoples M B, Chalk P M, Herridge D F (2002) Quantifying below-ground nitrogen of legumes. 2. A comparison of N-15 and non isotopic methods. Plant Soil 239:277-289

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

Landon F, Levieux J, Huignard J, Rougon D, Taupin P (1995) Feeding activity of Sitona lineatus L. (Col., Curculionidae) on Pisum sativum L. (Leguminosae) during its imaginal life. J. Appl. Entomol. 119:515-522

Le Bail M, Meynard J (2003) Yield and protein concentration of spring malting barley: the effects of cropping systems in the Paris Basin (France). Agronomie 23:13-27

Lemaire G, Gastal F (1997) N uptake and distribution in plant canopies. In: Diagnosis of the nitrogen status in crops. Lemaire G, Springer, pp 3-43

Lesourne J (1979) La rénovation de l'équilibre général et le comportement individuel en face de l'incertain. Economie appliquée. 287-300.

Li Y Y, Yu C B, Cheng X, Li C J, Sun J H, Zhang F S, Lambers H, Li L (2008) Intercropping alleviates the inhibitory effect of N fertilization on nodulation and symbiotic N_2 fixation of faba bean. Plant Soil. Doi:10.1007/s1110400999388

Liebman M (1988) Ecological suppression of weeds in intercropping systems: a review. Weed management in agroecosystems: Ecological approaches 197-212

Liebman M, Dyck E (1993) Crop rotation and intercropping strategies for weed management. Ecological Applications 3:92-122

Liebman M, Davis A (2000) Integration of soil, crop and weed management in low-external-input farming systems. Weed Res. 40:27-47

Limaux F, Recous S, Meynard J M, Guckert A (1999) Relationship between rate of crop growth at date of fertiliser N application and fate of fertiliser N applied to winter wheat. Plant Soil 214:49-59

Lithourgidis A S, Vasilakoglou I B, Dhima K V, Dordas C A, Yiakoulaki M D (2006) Forage yield and quality of common vetch mixtures with oat and triticale in two seeding ratios. Field Crops Res. 99:106-113

Loomis R S, Williams W A (1963) Maximum crop productivity: an estimate. Crop Sci. 3:67-72

Malézieux E, Crozat Y, Dupraz C, Laurans M, Makowski D, Ozier-Lafontaine H., Rapidel B, de Tourdonnet S, Valantin-Morison M (2008) Mixing plant species in cropping systems: concepts, tools and models. A review. Agron. Sustain. Dev. 29:43-62.

Marshall B, Willey R (1983) Radiation interception and growth in an intercrop of pearl millet/groundnut. Field Crops Res. 7:141-160

Mayer J, Buegger F, Jensen E, Schloter M, Hess J (2003) Residual nitrogen contribution from grain legumes to succeeding wheat and rape and related microbial process. Plant Soil 255:541-554

Mead R, Riley J (1981) A Review of Statistical Ideas Relevant to Intercropping Research. Journal of the Royal Statistical Society Series A-Statistics in Society 144:462-509.

Midmore D J (1993) Agronomic modification of resource use and intercrop productivity. Field Crops Res. 34:357-380

Mohta N K, De R (1980) Intercropping maize and sorghum with soya beans. J. Agric. Sci. 95:117-122

Monteith J (1977) Climate and the efficiency of crop production in Britain. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, B 281:277-294

Mote U, Patil M, Tambe A (2001) Role of intercropping in population dynamics of major pests of cotton ecosystem. Ann. Plant Protection Sci. 9:32-36

Munier B (1984) Quelques critiques de la rationalité économique dans l'incertain. Revue économique 35:65-80

Natarajan M, Willey R (1980) Sorghum-pigeonpea intercropping and the effects of plant population density. 1. Growth and yield. J. Agric. Sci. 95.51-58

Natarajan M, Willey R (1980) Sorghum-pigeonpea intercropping and the effects of plant population density. 2. Resource use. J. Agric. Sci. 95.59-65

Natarajan M, Kannaiyan J, Willey R, Nene Y (1985) Studies on the effects of cropping system on Fusarium wilt of pigeonpea. Field Crops Res. 10:333-346

Nelson S C, Robichaux R H (1997) Identifying plant architectural traits associated with yield under intercropping: implications of cultivar-cropping system interactions. Plant Breed. 116:163-170

O'Leary N, Smith M E (1999) Breeding corn for adaptation to two diverse intercropping companions. Am. J. Altern. Agric. 14:158-164

Ofori F, Stern W R (1987) Cereal – legume intercropping systems. Adv Agron 41:41-90

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

Peoples M B, Bowman A M, Gault R R, Herridge D F, McCallum M H, McCormick K M, Norton R M, Rochester I J, Scammell G J, Schwenke G D (2001) Factors regulating the contributions of fixed nitrogen by pasture and crop legumes to different farming systems of eastern Australia. Plant Soil 228:29-41

Perrin R (1977) Pest management in multiple cropping systems. Agro Ecosyst. 3:93-118

Petit M (1981) Théorie de la decision et comportement adaptatif des agriculteurs. In : formation des agriculteurs et apprentissage de la décision. Actes de la journée d'étude du 21 janvier 1981, Dijon, ENSSAA-INPSA-INRA-INRAP

Poggio S L (2005) Structure of weed communities occurring in monoculture and intercropping of field pea and barley. Agric. Ecosyst. Environ. 109:48-58

PROLEA (2007) De la production à la consommation France - Europe - Monde. Statistiques des oléagineux et protéagineux, huiles et protéines végétales 2006-2007. PROLEA. http://www.prolea.eu/fileadmin/extranet/Publications/plaquette_chiffres_2007.pdf. Accessed 18 Dec 2008

Quinn M A, Bezdicek D F, Smart L E (1999) An aggregation pheromone system for monitoring pea leaf weevil (Coleoptera: Curculionidae) in the Pacific Northwest. J. Kansas Entomological Soc. 72:315-321

R Development Core Team (2007) A language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna

Rämert B, Lennartsson M, Gareth D (2002) The use of mixed species cropping to manage pests and diseases - theory and practise. UK Organic Research 2002 Conference, Aberystwyth, 26-28 march 2002

Roger C, Tivoli B (1996) Spatio-temporal development of pycnidia and perithecia and dissemination of spores of Mycosphaerella pinodes on pea (Pisum sativum). Plant Pathology 45:518-528

Roger C, Tivoli B, Lemarchand E (1998) Epidemiological studies of ascochyta blight (M. pinodes) development on pea: understanding and predicting epidemics. 3rd European conference on grain legumes. Opportunities for high quality, healthy and added-value crops to meet European demands. Valladolid, Spain, 14-19 November 1998.

Root R B (1973) Organisation of a plant-arthropod association in simple and diverse habitats: the fauna of collards (Brassica oleracea). Ecology Monograph 43:95-124

Samaan J, El-Khayat G H, Manthey F A, Fuller M P, Brennan C S (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

Savage L J (1951) The theory of statistical decision. J Am. Stat. Ass. 46:55-67

Sebillotte M (1974) Agronomie et agriculture. Essai d'analyse des tâches de l'agronome. Cahiers ORSTOM série Biol. 24:3-25

Sebillotte M, Soler L G (1988) C.R. Acad. Agric. Fr. 74:59-70

Sfez L (1974) Critique de la décision. Cahiers de la fondation nationale des sciences publiques. Armand Colin, Paris.

Shearer G, Kohl D H (1986) N-2-fixation in field settings - Estimations based on natural N-^{15} abundance. Aust. J. Plant Physiol. 13:699-756

Sheskin D J (2004) Handbook of parametric and nonparametric statistical procedures. Third edition. Chapman and Hall/CRC, Boca Raton

Shibles R M, Weber C R (1966) Interception of solar radiation and dry matter production by various soybean planting patterns. Crop Sci. 6:55-59

Simon H A (1957) Administration behaviour: Studymaking processive in administrative organization. Traduction française 1983, Economica, Paris.

Simon H A (1978) Rationality as process and as product of thought. Am. Economic Review. 68:1-16

Simon H A (1982) Models of bounded rationality : behavioral économies and business organization. MIT Press, Cambridge

Sinoquet H, Caldwell R M (1995) Estimation of light capture and partitioning in intercropping systems. In Ecophysiologie of tropical intercropping. INRA, Paris, pp.79-97

Sivakumar M V, Virmani S (1980) Growth and resource use of maize, pigeonpea and maize/pigeonpea intercrop in an operational research watershed. Exp. Agric. 16:377-386

Sivakumar M V, Virmani S (1984) Crop productivity in relation to interception of photosynthetically active radiation. Agric. Forest Meteorology 31:131-141

Snaydon R W, Satorre E H (1989) Bivariate diagrams for plant competition data - Modifications and interpretation. J. Appl. Ecol. 26:1043-1057

Snyder K M, Baskin J M, Baskin C C (1994) Comparative ecology of the narrow endemic echinacea-Tennesseensis and two geographically widespread congeners - relative competitive ability and growth-haracteristics. Int. J. Plant Sci. 155:57-65

Soussana J F, Arregui M C (1995) Effect of mixed cropping on the nitrogen nutrition and growth of perennial ryegrass and white clover. Agronomie 15:81-96

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

Steiner J (1986) Dryland grain sorghum water use, light interception, and growth responses to planting geometry. Agronomy J. 78:720-726

Stern W (1993) Nitrogen fixation and transfer in intercrop systems. Field Crops Res. 34:335-356

Stirling C, Williams J, Black C, Ong C (1990) The effect of timing of shade on development, dry matter production and light-use efficiency in groundnut (Arachis hypogaea L.) under field conditions. Aust. J. Agric. Res. 41:633-644

Sullivan P (2001) Intercropping principles and practices. Agronomy Systems Guide. Appropriate Technology Transfer for Rural Area, National Sustainable Agriculture Information Service. http://attra.ncat.org/attra-pub/PDF/intercrop.pdf. Accessed 30 Jul. 2009.

Tivoli B (1994) Conséquences des attaques parasitaires foliaires sur l'élaboration du rendement des plantes à croissance indéterminée. In: Agrophysiologie du pois protéagineux. Applications à la production agricole. INRA-ITCF-UNIP, Paris, pp 199-219

Tofinga M, Paolini R, Snaydon R (1993) A study of root and shoot interactions between cereals and peas in mixtures. J. Agric. Sci. 120:13-24

Tompkins D, Fowler D, Wright A (1993) Influence of agronomic practices on canopy microclimate and Septoria development in no-till winter wheat produced in the Parkland region of Saskatchewan. Can. J. Plant Sc. 73:283-289

Trenbath B R (1974) Biomass productivity of mixtures. Adv. Agron. 26:177-210

Trenbath B R (1986) Resource use by intercrops. In: Francis C A (ed) Multiple cropping systems. MacMillan, New York, pp 57-81

Trenbath B R (1993) Intercropping for the management of pests and diseases. Field Crops Res. 34:381-405

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

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

Tsubo M, Walker S (2002) A model of radiation interception and use by a maize-bean intercrop canopy. Agric. Forest Meteorology 110:203-215

Tsubo M, Walker S (2004) Shade effects on Phaseolus vulgaris L. intercropped with Zea mays L. under well-watered conditions. J. Agronomy Crop Sci. 190:168-176

Unkovich M, Herridge D, Peoples M, Cadisch G, Boddey R, Giller K, Alves B, Chalk P (2008) Measuring plant-associated nitrogen fixation in agricultural systems. Clarus design, Canberra

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

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

Varlet-Grancher C, Bonhomme R, Chartier M, Artis P (1982) Efficiency of solar energy conversion by a plant canopy. Acta Oecologica, Oecologia Plant 3:3-26

Vasilakoglou I B, Lithourgidis A S, Dhima K V (2005) Assessing common vetch-cereal intercrops for suppression of wild oat, Proceedings of 13th International Symposium, Session S5 European Weed Research Society, Bari, Italy

Vilich-Meller V (1992) Mixed cropping of cereals to suppress plant diseases and omit pesticide applications. Biological Agriculture Horticulture 8:299-308

Vocanson A, Munier-Jolain N, Voisin A S, Ney B (2005) Nutrition azotée. In: Agrophysiologie du pois protéagineux. INRA-ARVALIS-UNIP-ENSAM, Paris, pp 81-106

Voisin A S, Salon C, Munier-Jolain N G, 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

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

Wale S J, Colhoun J (1979) Further studies on the aerial dispersal of Leptosphaeria nodorum. J. Phytopathology 94:185-189

Walklate P (1989) Vertical dispersal of plant pathogens by splashing. Part I: the theoretical relationship between rainfall and upward rain splash. Plant Pathology 38:56-63

Watiki J, Fukai S, Banda J, Keating B (1993) Radiation interception and growth of maize/cowpea intercrop as affected by maize plant density and cowpea cultivar. Field Crops Res. 35:123-133

White J, Scott T (1991) Effects of perennial forage-legume living mulches on no-till winter wheat and rye. Field Crops Res. 28:135-148

Willey R W, Osiru D S O (1972) Studies on mixtures of maize and beans (Phaseolus vulgaris) with particular reference to plant population. J. Agric. Sci. 79:517-529

Willey R (1979a) Intercropping - its importance and research needs. 1. Competition and yield advantages. Field Crop Abstr. 32:1-10

Willey R (1979b) Intercropping - its importance and research needs. 2. Agronomy and research needs. Field Crop Abstr. 32:73-85

Willey R, Rao M (1980) A competitive ratio for quantifying competition between intercrops. Exp. Agric. 16:117-125

Willey R W (1990) Resource use in intercropping systems. Agric. Water Manag. 17:215-231

Williams A C, McCarthy B C (2001) A new index of interspecific competition for replacement and additive designs. Ecological Res. 16:29-40

Wilman D, Pearse P J (1984) Effects of applied nitrogen on grass yield, nitrogen-content, tillers and leaves in field swards. J. Agric. Sci. 103:201-211

Wilson J (1988) Shoot competition and root competition. J. Appl. Ecol. 25:279-296

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 15N techniques. Plant Soil 262:45-54

Zadoks J C, Chang T T, Knozak C F (1974) A decimal code for the growth stages of cereals. Weed Res. 14:415-421

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE ET DEMARCHE

Figure 1 Schéma conceptuel permettant l'étude : a) des compétitions intraspécifiques (rang), b) des compétitions interspécifiques (rang) et c) de l'équilibre entre compétitions intra- et interspécifiques (comparaison sur le rang ou la surface) (d'après Cruz et Soussana 1997).

CHAPITRE II : MATERIELS ET METHODES

Figure 2 Données journalières et cumulées de température, précipitation et rayonnement global enregistrées sur la station expérimentale de l'INRA de Toulouse-Auzeville (Latitude 43°31' N, Longitude 1°29' E, Altitude 150 m) ainsi que la quantité d'eau dans le sol calculée à partir du bilan hydrique du 1er novembre à la récolte du blé dur pour 2005-2006, 2006-2007 et 2007-2008 et pour la période 1984-2008.

Figure 3 Stades clés et apports d'azote (N) lors des trois années d'expérimentation (2005-2006, 2006-2007 et 2007-2008) représentés sur une échelle calendaire couplée à une échelle de temps thermique (base 0 °C) : semis (S), semis décalé (S2), levée blé dur (LB), levée pois d'hiver (LP), levée féverole d'hiver (LF), stade épi 1cm du blé dur (E1cm, Zadoks 30), début floraison légumineuse (DFL), floraison blé dur (FB, Zadoks 69), récolte du pois d'hiver à maturité physiologique (RP) et récolte du blé dur (RB), de la féverole d'hiver (F) et des associations (Asso) à maturité physiologique du blé dur.

Figure 4 Graphical representation of all possible outcomes of an interaction experiment with two species. The diagonal line corresponding to $LER_{Y-W} = LER_{Y-P}$ separates the areas of the graph in which winter pea has a competitive advantage over durum wheat (W) for grain yield production (a) and vice versa (b). The other diagonal corresponding to $LER_Y = LER_{Y-W} + LER_{Y-P} = 1$ separates the areas of the graph where sole crops are more efficient than the intercrop (IC) for grain yield production (c) and vice versa (d). Areas corresponding to partial LER values below 0.5 for pea (f) and for wheat (g) indicate that species grain yield (per plant or row) is less in the mixture than in the sole crop because each species was sown in the intercrop at half of its sole crop density. Conversely, areas corresponding to values above 0.5 for pea (e) and for wheat (h) represent situations where species grain yield (per plant or row) is higher when intercropped. Area (i) corresponds to situations in which pea suppresses wheat; the reverse is true in area (l). Finally, in area (k) both species are suppressed in the mixture due to competition while in area (j) both species grow better in the mixture (per plant or row) than they did as sole crops, indicating so-called "facilitation". The neutral point (n) at $LER_{Y-W} = LER_{Y-P} = 0.5$ indicates situations in which the two species' grain yield (per plant or row) are similar in the mixture and in sole crops.

Figure 5 Aggressivity for yield and shoot N accumulated (a), change in contribution for yield and shoot N accumulated (b), sowing plant aggressivity for yield and shoot N accumulated (c), actual plant aggressivity for yield and shoot N accumulated (d) for the different N treatments (Nx where 'x' represents N applied in kg N ha^{-1}) of experiments I and II. Values are the mean (n=3 to 5). Horizontal bars indicate upper and lower values of confident interval at p=0.10.

Figure 6 Partial land equivalent ratio of pea (LER_P) as a function of the partial land equivalent ratio of wheat (LER_W) calculated from: a) grain yield or b) shoot N accumulated for the different N treatments (Nx where 'x' represents N applied in kg N ha^{-1}) of experiment. I (square symbols) and experiment II (triangle symbols).

Figure 7 Wheat interspecific interaction index (IE) as a function of wheat intraspecific interaction index (IA) calculated from: a) grain yield or b) shoot N accumulated for the different N treatments (Nx where 'x' represents N applied in kg N ha^{-1}) of experiment I (square symbols) and experiment II (triangle symbols). * indicates that the half density sole crop wheat reference was the N100 treatment (experiment I only).

CHAPITRE III : EVALUATION DE LA PERFORMANCE DES ASSOCIATIONS BLE DUR – LEGUMINEUSES A GRAINES POUR LA PRODUCTION DE GRAINES ET LA TENEUR EN PROTEINES DU BLE

Figure 8 N accumulated (kg N ha^{-1}) in sole crops (SC) and intercrops (IC) of pea (P) and wheat (W) in straw and grain for the different N treatments (Nx where 'x' represents N applied in kg N ha^{-1}). Values are means (n=3 to 5) ± standard error for crops N accumulated in straw and grain.

Figure 9 Partial land equivalent ratio (LER) for wheat and pea calculated from (a) N accumulated (LER_N), (b) dry weight (LER_{DW}), (c) grain yield (LER_Y) for the two experiments and N treatments (Nx where 'x' represents N applied in kg N ha^{-1}). Values are the mean (n=3 to 5) ± standard error. Single plus (+) and single asterisks (*) above the bars indicate that LER is significantly different from 1, at P<0.10 and P<0.05, respectively. Single plus (+) and single asterisks (*) inside the bars indicate that partial LER (either for wheat or pea) is significantly different from 0.5, at P<0.10 and P<0.05, respectively; 'ns' indicates non-significant (P>0.10).

Figure 10 Dry weight (t ha^{-1}) of sole crops (SC) and intercrops (IC) of pea (P) and wheat (W) for straw and grain for the different N treatments (Nx where 'x' represents N applied in kg N ha^{-1}). Values are means (n=3 to 5) ± standard error for grain and for the whole dry weight.

Figure 11 Relationship between grain protein concentration (% of dry weight) of the intercropped (IC) wheat and sole cropped (SC) wheat for the different N treatments (Nx where 'x' represents N applied in kg N ha^{-1}) of Exp. I and II. A linear regression was fitted including all N treatments and experiments. Double asterisk (**) indicate that linear regression is significant at P=0.01. Values are means (n=3 to 5) ± standard error. The first bisector y=x and the regression y=1.2x are indicated in order to illustrate the increased range of grain protein concentration in IC compared with SC.

Figure 12 Land equivalent ratio calculated from yield (LER_Y) of the total intercrop (Total IC) and partial LER_Y values of intercropped wheat (Wheat IC) and intercropped pea (Pea IC) as a function of (a) N accumulated by the whole intercrop at the beginning of pea flowering (BPF); (b) mineral N available until BPF (mineral N at sowing + N fertilization applied before BPF + N mineralized from humus and residues until BPF - N leaching until BPF); (c) the percentage of pea N derived from air at physiological maturity and (d) the amount of pea N accumulated from air at physiological maturity (QNdfa). Linear regressions were carried out for LERY, $LER_{Y\text{-}W}$ and $LER_{Y\text{-}P}$. Values are the mean (n=3 to 5) ± standard error. Single plus (+), single asterisk (*) and double asterisk (**) indicate that linear regression is significant at P=0.10, P=0.05 and P=0.01, respectively.

Figure 13 Grain protein concentration of wheat (% of dry weight) as a function of the dry grain yield (t ha^{-1}) for sole cropped (SC) wheat (solid symbols) and intercropped (IC) wheat (open symbols) for the different N treatments (Nx where 'x' represents N applied in kg N ha^{-1}) for Experiment I (a) and Experiment II (b). Linear regressions were carried out for each N treatment, including both sole and intercropped treatments. Single plus (+), single asterisk (*) and double asterisk (**) indicate that linear regression is significant at P=0.10, P=0.05 and P=0.01, respectively.

Figure 14 Azote accumulé (kg N ha^{-1}) dans les pailles et les grains de la féverole d'hiver (F) et du blé dur (B) en culture « pure » (SC) et en association (IC) pour les différentes expérimentations et traitements. Les valeurs sont la moyenne de n=3 à 5 ± écart type calculé sur l'azote total accumulé (pailles + grains) par le blé dur et par la féverole d'hiver.

Figure 15 Land equivalent ratio partiels (LER) du blé dur et de la féverole d'hiver calculés à partir de l'azote accumulé (LER_N) pour les différentes expérimentations et traitements. Les valeurs sont la moyenne de n=3 à 5 ± écart type. Les symboles (+) et (*) au dessus des barres indiquent que les valeurs de LER sont significativement différentes de 1 à P<0.10 et P<0.05 respectivement. Les symboles (+) et (*) dans les barres indiquent que les valeurs de LER partiels (du blé dur et de la féverole d'hiver) sont significativement différentes de 0.5 à P<0.10 et P<0.05 respectivement. 'ns' indique que les valeurs sont non significatives (P>0.10).

Figure 16 Matière sèche (t ha^{-1}) des pailles et des grains de la féverole d'hiver (F) et du blé dur (B) en culture « pure » (SC) et en association (IC) pour les différentes expérimentations et traitements. Les valeurs sont la moyenne de n=3 à 5 ± écart type calculé sur le rendement et sur la matière sèche totale.

Figure 17 Land equivalent ratio partiels (LER) du blé dur et de la féverole d'hiver calculés à partir (a) de la matière sèche (LER_{DW}) et (b) du rendement (LER_Y) pour les différentes expérimentations et traitements. Les valeurs sont la moyenne de n=3 à 5 ± écart type. Les symboles (+) et (*) au dessus des barres indiquent que les valeurs de LER sont significativement différentes de 1 à P<0.10 et P<0.05 respectivement. Les symboles (+) et (*) dans les barres indiquent que les valeurs de LER partiels (du blé dur et de la féverole d'hiver) sont significativement différentes de 0.5 à P<0.10 et P<0.05 respectivement. 'ns' indique que les valeurs sont non significatives (P>0.10).

Figure 18 Teneur en protéines du blé dur en association avec la féverole d'hiver (% de la matière sèche) en fonction de la teneur en protéines du blé dur en culture « pure » pour les différentes expérimentations et traitements. En 2006-2007, les points correspondent à la moyenne des traitements azotés par cultivar.

Figure 19 Teneur en protéines (% de la matière sèche) du blé dur en fonction du rendement du blé dur en culture « pure » et en association avec la féverole d'hiver en a) 2005-2006 et 2007-2008 et b) 2006-2007 (tous cultivars de blé dur confondus). '**' et '***' indiquent que les régressions sont significatives à P=0.01 et P=0.001 respectivement.

Figure 20 Evolution de la quantité d'azote accumulée dans les parties aériennes en kg N ha^{-1} dans les cultures « pures » (SC) et les associations (IC) pour la féverole d'hiver (F) et le blé dur (BD) en a) 2006-2007 et b) 2007-2008 en fonction de la somme de degrés jours depuis l'émergence du blé dur. Les valeurs sont la moyenne de n=3 à 6.

Figure 21 Evolution de la matière sèche aérienne en t ha^{-1} dans les cultures « pures » (SC) et les associations (IC) pour la féverole d'hiver (F) et le blé dur (BD) en a) 2006-2007 et b) 2007-2008 en fonction de la somme de degrés jours depuis l'émergence du blé dur. Les valeurs sont la moyenne de n=3 à 6.

Figure 22 Evolution de la hauteur des couverts en cm dans les cultures « pures » (SC) et les associations (IC) pour la féverole d'hiver (F) et le blé dur (BD) en a) 2006-2007 et b) 2007-2008 en fonction de la somme de degrés jours depuis l'émergence du blé dur. Les valeurs sont la moyenne de n=3 à 6.

Figure 23 Matière sèche et rendement (t ha^{-1}) de la féverole d'hiver en association (IC) en fonction de la matière sèche du blé dur en association (t ha^{-1}) pour l'ensemble des expérimentations et traitements. Les régressions linéaires ont été obtenues en considérant l'ensemble des points '***' indique que la régression est significative à P=0.001.

Figure 24 Matière sèche et rendement (t ha^{-1}) du blé dur en association (IC) en fonction de la matière sèche de la féverole d'hiver en association (t ha^{-1}) pour l'ensemble des expérimentations et traitements. Les régressions linéaires ont été obtenue en considérant l'ensemble des points '***' indique que la régression est significative à P=0.001.

Figure 25 Matière sèche du blé dur et de la féverole d'hiver en association (IC) en fonction du rapport entre le nombre de plantes de féverole d'hiver et de blé dur observées en association.

Figure 26 Matière sèche du blé dur et de la féverole d'hiver en association (IC) en fonction du rapport entre le nombre de plantes de blé dur et de féverole d'hiver observées en association. Les régressions linéaires ont été obtenue en considérant l'ensemble des points '***' indique que la régression est significative à P=0.001.

Figure 27 Evolution de la matière sèche d'une espèce 'B' en fonction de la matière sèche de l'espèce associée 'A' en considérant un modèle concave (A), convexe (B), linéaire (C) ou des modèles complexes (D et E). Les flèches indiquent les asymptotes horizontales et verticales.

CHAPITRE IV : ETUDE DES DYNAMIQUES, COMPETITIONS ET COMPLEMENTARITES ENTRE ESPECES DANS LES ASSOCIATIONS BLE DUR – POIS D'HIVER

Figure 28 Major stages and sampling dates which occurred during the experimental periods represented on a calendar scale coupled with a degree day scale (base 0°C) scale: sowing (S), wheat emergence (WE), pea emergence (PE), wheat tillering stage (WT), pea leaf development (LD), '1 cm ear' stage of wheat (E1cm), beginning of pea stem elongation (SE), 'visible flag leaf' stage of wheat (FL), beginning of pea flowering (BPF), wheat flowering (WF), end of pea flowering (EPF), wheat ripening (WR), final harvest for pea sole crop (PSC H) and final harvest for wheat sole crop and intercrop (WSC and IC H). Wheat stages are indicated with a 'Z' (for Zadoks scale) followed by the number of the stage e.g. 'Z 30'. Dates of fertilizer-N application are indicated with a bold 'N' for both experiments.

Figure 29 Dynamics of green leaf area index (GLAI) of sole crops (SC) and intercrops (IC) of pea and wheat for the different N treatments (Nx where 'x' represents N applied in kg N ha^{-1}) and dates of sampling. Values are means (n=3 to 5). For each date of sampling, vertical bars on the top of the figure correspond to standard deviation of the total IC, Wheat IC, Pea IC, Wheat SC and Pea SC (N0 only) respectively. Asterisks on the x-axis correspond to fertilizer-N application.

Figure 30 Evolution of total shoot dry weight (DW) production in t ha^{-1} of sole crops (SC) and intercrops (IC) of pea and wheat for the different N treatments (Nx where 'x' represents N applied in kg N ha^{-1}) and dates of sampling. Values are means (n=3 to 5). For each date of sampling, vertical bars on the top of the figure correspond to standard deviation of the total IC, Wheat IC, Pea IC, Wheat SC and Pea SC (N0 only) respectively. Asterisks on the x-axis indicate fertilizer-N applications.

Figure 31 Evolution of the PAR fraction absorbed of sole crops (SC) of pea or wheat and of the whole intercrop (IC) measured throughout crop growth for the different N treatments (Nx where 'x' represents N applied in kg N ha^{-1}). Values are means (n=3 to 5) and curves are regressed non-linearly against thermal time using the following logistic model: $$F_{PARa} = F_{PAR\max} \times \frac{\exp(K1 \times (t - K2))}{1 + \exp(K1 \times (t - K2))}$$

Figure 32 Total shoot N accumulation in kg N ha^{-1} of sole crops (SC) and intercrops (IC) of pea and wheat for the different N treatments (Nx where 'x' represents N applied in kg N ha^{-1}) and dates of sampling. Values are means (n=3 to 5). For each date of sampling, vertical bars on the top of the figure correspond to standard deviation of the total IC, Wheat IC, Pea IC, Wheat SC and Pea SC (N0 only) respectively. Asterisks on the x-axis indicate fertilizer-N application.

Figure 33 Partial land equivalent ratio (LER) of wheat and pea calculated from dry weight (LER_{DW}) and N accumulated (LER_N) for the two experiments and N treatments (Nx where 'x' represents N applied in kg N ha^{-1}) for the different dates of sampling: i) wheat tillering (WT), ii) stage '1cm ear' of wheat (E1cm), iii) pea flowering (PF), iv) wheat flowering (WF) and v) harvest (H). Values are the mean (n=3 to 5) ± standard error. Single plus (+) and single asterisks (*) indicate that LER is significantly different from 1 at P=0.10 and P=0.05 respectively.

Figure 34 Nitrogen nutrition index (NNI) of wheat in a sole crop (SC) and intercrop (IC) for the different N treatments (Nx where 'x' represents N applied in kg N ha^{-1}) and dates of sampling. Values are means (n=3 to 5) ± standard error. Asterisks on the x-axis indicate fertilizer-N application.

Figure 35 Wheat dry weight interspecific interaction index (IE_{DW}) as a function of wheat dry weight intraspecific interaction index (IA_{DW}) for the different N treatments and wheat cultivars (Acalou: A, Nefer: N, Neodur: D and Orjaune: O) at: a) beginning of pea flowering, b) wheat flowering and c) wheat physiological maturity. Values are the mean (n=3 to 4).

Figure 36 Wheat interspecific interaction index (a and c) and wheat intraspecific interaction index (b and d) calculated from the number of plants m^{-2}, the number of ears m^{-2}, the number of grains m^{-2} or the yield for the different wheat cultivars (Acalou: Ac, Nefer: Nf, Neodur: Nd and Orjaune: Oj) considering: a and b) the average of all N treatments or c and d) the average of all wheat cultivars. Values are the mean (n=12 to 16).

Figure 37 For the different N treatments: a) Mean intercropped (IC) wheat grain protein content (GPC_{IC} in % of dry weight) as a function of mean half density sole cropped wheat grain protein content ($GPC_{SC1/2}$) for the different wheat cultivars (A: Acalou, N: Nefer, D: Neodur and O: Orjaune) values are the mean (n=3 to 4), b) ratio between intercropped and half density sole cropped wheat grain protein content as a function of the interspecific interaction index for yield (IE_Y) for all the replicates and finally c) estimated intercropped wheat grain protein content as a function of observed values considering the linear model: $GPC_{IC} = a \times GPC_{SC1/2} + b \times IE_Y + c$ including all N treatments. Double asterisk (**) and triple asterisk (***) indicate that that linear regression are significant at P=0.01 and P=0.001 respectively.

CHAPITRE V : CONCEPTION PAR EXPERTISE ET EVALUATION DE PROTOTYPES D'ITINERAIRES TECHNIQUES D'ASSOCIATIONS BLE DUR – LEGUMINEUSES A GRAINES

Figure 38 Azote accumulé (kg N ha^{-1}) dans les pailles et les grains du pois d'hiver et du blé dur en culture « pure » (SC) et en association (IC) pour les différents traitements. Les valeurs sont la moyenne de n=3 à 6 ± écart type calculé sur l'azote total accumulé (pailles + grains) par le blé dur et par le pois d'hiver.

Figure 39 Matière sèche (t ha^{-1}) des pailles et des grains du pois d'hiver et du blé dur en culture « pure » (SC) et en association (IC) pour les différents traitements. Les valeurs sont la moyenne de n=3 à 6 ± écart type calculé sur le rendement et sur la matière sèche totale.

Figure 40 Land equivalent ratio partiel de la légumineuse (LER_L) en fonction du land equivalent ratio partiel du blé dur (LER_{BD}) calculés à partir a) du rendement (LER_Y) ou b) de l'azote accumulé dans les parties aériennes (LER_N) pour les différents traitements. Les valeurs sont la moyenne de n=3 à 6 ± écart type.

Figure 41 Teneur en protéines du blé dur (en % de la matière sèche) en fonction du rendement du blé dur à 0% d'humidité pour en culture « pure » et en association avec a) le pois d'hiver et b) la féverole d'hiver. Les valeurs sont la moyenne de n=3 à 6. La régression linéaire (a) a été obtenue en considérant l'ensemble des traitements N35P1. '**' indique que la régression est significative à P=0.01.

Figure 42 Quantité d'azote minéral (nitrate et ammonium) sur 0-120 cm en kg N ha^{-1} par horizon pour les différents traitements. Les valeurs au dessus des barres correspondent à la quantité total en moyenne pour les trois blocs sur 0-120 cm ± écart type. Pour les cultures « pures » de légumineuses nous avons considéré la moyenne des traitements N0AB*, N0P1 et N0P3 et dans le cas de la culture « pure » de blé dur N75P1 semée à la date normale la moyenne des cultivars L1823 et Neodur.

Figure 43 Evolution du pourcentage de la surface foliaire des feuilles du blé dur atteinte par la septoriose (moyenne des trois dernières feuilles émises) : a) en culture « pure » et b) en culture associée pour les différents traitements. Les valeurs sont la moyenne de n=3 à 9.

Figure 44 Evolution du pourcentage de la surface foliaire des feuilles du pois d'hiver et de la féverole d'hiver atteinte par l'anthracnose : a) en culture « pure » et b) en culture associée pour les différents traitements. Les valeurs sont la moyenne de n=3 à 9.

Figure 45 Pourcentage de nodosités percées et nombre de larves présentes par plante dans les nodosités au 30/04/2008 dans les cultures « pures » de pois d'hiver (P SC) et de féverole d'hiver (F SC) et les associations avec le blé dur (IC P et IC F). Les valeurs sont la moyenne de n=3. Les barres verticales indiquent les valeurs maximales et minimales mesurées.

Figure 46 Nombre de sitones par plante et par mètre carré ayant émergées entre le 30/04/08 et le 18/06/2008 puis entre le 22/06/2008 et le 11/07/2008 dans les cultures « pures » de pois d'hiver (P SC), de féverole d'hiver (F SC) et les associations avec le blé dur (IC P et IC F). Les valeurs sont la moyenne de n=3. Les barres verticales indiquent les valeurs maximales et minimales mesurées sur la période allant du 30/04/2008 au 11/07/2008.

Figure 47 Nombre de pucerons verts par plante et par m2 en considérant la moyenne des comptages effectués le 15/04/2008 et le 19/05/2008 dans les cultures « pures » de pois d'hiver (P SC) et de féverole d'hiver (F SC) et les associations avec le blé dur (IC P et IC F). Les valeurs sont la moyenne de n=6. Les barres verticales indiquent les valeurs maximales et minimales observées lors des deux comptages.

Figure 48 Quantité de mauvaises herbes (t ha^{-1}) – chardon, folle avoine et matricaire – dans les cultures « pures » de pois d'hiver (P SC), de féverole d'hiver (F SC), de blé dur (BD SC) et les associations blé dur – pois d'hiver (IC P) et blé dur – féverole d'hiver (IC F) pour les différents traitements ainsi qu'en moyenne pour les blocs 1, 2 et 3. Les valeurs sont la moyenne de n=3 à 6 (n=15 pour les moyennes par bloc). Les barres verticales indiquent les valeurs maximales et minimales mesurées. Dans le cas des cultures « pures » de pois d'hiver les espèces n'ont pas été identifiées.

Figure 49 Charges, produits et marge directe (€ ha^{-1}) en considérant les différents postes que sont les aides (DPU, aide à la surface, aides blé dur et protéagineux), les produits bruts de la vente des cultures, les bonus et malus liés à la qualité du blé dur et enfin les charges opérationnelles et matérielles qui incluent le coût de traction et de main d'œuvre pour les différents itinéraires techniques.

Figure 50 Effet de la culture associée sur la dissémination des spores de *Septoria tritici* ou de *Mycosphaerella pinodes*. D'après le Groupe Pilote Fongicides Durable et Réseau Opticoop 2003, Walklate 1989 et Tompkins et al. 1993.

Figure 51 Effet de l'entourage proche (trèfle) sur la reconnaissance de la culture (chou) par la mouche du chou dans le couvert. D'après Finch et Collier 2000. 1) la mouche sent une odeur diffuse de sa plante hôte présente dans l'association ; 2) quand les composés odorants sont assez concentrés dans l'air, elle descend vers la culture. Le chou étant en association, la perception de l'insecte (à une distance < 1m) est troublé dure par une végétation « verte » se confondant avec le chou. Soit la mouche atterrit sur le chou (3a) pour descendre pondre à sa base en (3c), soit elle atterrit sur le trèfle (3b) puis repart en (4). Le processus se répète ensuite (5, 6 et 7).

Figure 52 Effet de l'environnement proche (trèfle) sur l'acceptance de la plante hôte (chou) par la mouche du chou. D'après Finch et Collier 2000. Les numéros fléchés représentent quatre vols de feuille à feuille réalisés par l'insecte pour vérifier s'il est bien sur la plante hôte dans laquelle il va pondre ses œufs. Le nombre en bas de la plante représente le pourcentage d'insectes ravageurs qui parviennent jusqu'à leur lieu de ponte au collet de la plante.

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE II : MATERIELS ET METHODES

Tableau 1 Caractéristiques des différentes variétés utilisées obtenues par le GEVES dans le cadre de l'expérimentation CTPS (Source : Les variétés de céréales du catalogue officiel français – n°4 2005). L'alternativité indique le besoin en froid des variétés il varie de 1 (Très hiver) à 9 (Printemps). La précocité d'épiaison varie de 1 (Très tardif) à 9 (Très précoce). Les notes de qualité technologique, de sensibilité aux accidents climatiques et aux maladies varient de 1 (Très sensible) à 9 (Résistant).

Tableau 2 Description des traitements expérimentaux considérés en 2005-2006 : culture, variétés, structure du couvert (B : Blé dur, P : Pois d'hiver, F : Féverole d'hiver), densité de semis (grains m^{-2}), densité observée (plantes m^{-2} en moyenne pour tous les traitements azotés), identifiant et nombre de répétitions par traitement.

Tableau 3 Description des traitements expérimentaux considérés en 2006-2007 : culture, variétés, structure du couvert (B : Blé dur, P : Pois d'hiver, F : Féverole d'hiver), densité de semis (grains m^{-2}), densité observée (plantes m^{-2} en moyenne pour tous les traitements azotés), identifiant et nombre de répétitions par traitement.

Tableau 4 Description des traitements expérimentaux considérés en 2007-2008 : culture, variétés, date de semis, structure du couvert (B : Blé dur, P : Pois d'hiver, F : Féverole d'hiver), densité de semis (grains m^{-2}), densité observée (plantes m^{-2}), identifiant, fertilisation (kg N ha^{-1}), traitement de semence, désherbage (chimique ou mécanique), insecticide, fongicide et nombre de répétitions par traitement.

Tableau 5 Analyse granulométrique, pH et teneur en $CaCO_3$ par horizon mesurés sur des échantillons de sols prélevés lors des trois années d'expérimentation (2005-2006, 2006-2007 et 2007-2008).

Table 6 Description of the different N treatments for experiments I and II: i) stages (Zadoks scale) and amount of fertilizer-N, ii) previous crop and amount of fertilizer-N, iii) initial mineral N (0-120 cm depth), iv) estimated available mineral N and v) number of replicates for the sole crops (SC), the half density sole crops (SC1/2) and the intercrops (IC).

Table 7 Cumulative relative efficiency index (REIc) and comparative absolute growth rate (CGR) calculated for the time interval corresponding to the dates of sampling: sowing to '1cm ear' stage of wheat (E1cm), E1cm to the beginning of pea flowering (BPF), BPF to wheat flowering (WF), WF to harvest (Harvest) and for the whole growth period (Sowing to Harvest) for the different N treatments (Nx where 'x' represents N applied in kg N ha^{-1}) of experiments I and II. Values are the mean ± standard error. Single plus (+) and single asterisks (*) indicate that REIc or CGR are significantly different from 1 at P=0.10 and P=0.05 respectively.

Table 8 Grain yield (t ha^{-1}) and N accumulated in shoots (kg N ha^{-1}) for the sole crops (SC), the half density sole crops (SC1/2) and the intercrops (IC) in experiments I and II for the different N treatments (Nx where 'x' represents N applied in kg N ha^{-1}). Values are the mean (n=3 to 5) ± standard error.

CHAPITRE III : EVALUATION DE LA PERFORMANCE DES ASSOCIATIONS BLE DUR – LEGUMINEUSES A GRAINES POUR LA PRODUCTION DE GRAINES ET LA TENEUR EN PROTEINES DU BLE

Table 9 Detailed data used for N-balance calculation of the different N treatments (Nx where 'x' represents N applied in kg N ha^{-1}) for various periods: from sowing (S) to the beginning of pea flowering (BPF), or BPF to harvest (H) or S to H. Data are: i) characteristics of incorporated residues, ii) topsoil organic N content, iii) 0-120 soil N mineral content at sowing, iv) apparent N-fertilizer-use efficiency, v) apparent N fertilizer available and corresponding N fertilizer applied, vi) simulated N mineralization (humus and residues) using the STICS soil-crop model, vii) simulated N leaching using STICS model, viii) calculated apparent available N and ix) soil N mineral content at 0-120 cm depth at harvest for the intercrops (IC) and the sole crops of wheat (W SC) and pea (P SC).

Table 10 Data of ^{15}N excess ($\delta^{15}N$) values for the different N treatments (Nx where 'x' represents N applied in kg N ha^{-1}): i) $\delta^{15}N$ for a non-fixing pea (Frisson) sole crop (SC), intercropped (IC) wheat, IC pea and SC pea at wheat flowering (WF), wheat harvest (WH) and pea harvest (PH), ii) fraction of plant N derived from air (%Ndfa) of SC and IC pea calculated as the mean of WF and PH using $\delta^{15}N$ average value of wheat at WF and WH and iii) amount of N derived from air (QNdfa) of SC and IC pea at pea harvest. Values are the mean (n=3 to 5) ± standard error.

Tableau 11 Description des traitements expérimentaux considérés : année, culture, structure du couvert, variétés, densités espérées et observées, traitement de semence, désherbage, insecticide, fongicide et nombre de répétitions par traitements azotés.

Tableau 12 Pour les différentes expérimentations et traitements : i) excès isotopique ^{15}N ($\delta^{15}N$) du blé dur en association (plante référence pour le calcul de la fixation symbiotique) et de la féverole d'hiver en culture « pure » (SC) et en association (IC) mesuré à la récolte, ii) pourcentage de l'azote accumulé par la féverole d'hiver en SC et IC issu de la fixation symbiotique (%Ndfa) et iii) quantité d'azote provenant de la fixation symbiotique (QNdfa). Les valeurs correspondent à la moyenne ± écart type.

CHAPITRE IV : ETUDE DES DYNAMIQUES, COMPETITIONS ET COMPLEMENTARITES ENTRE ESPECES DANS LES ASSOCIATIONS BLE DUR – POIS D'HIVER

Table 13 Canopy height (cm) of sole crops (SC) and intercrops (IC) measured at '1 cm ear' stage of wheat (E1cm), beginning of pea flowering (BPF) and wheat flowering (WF) for the unfertilized plots (N0) or considering the mean of all N treatments. Values are the mean of (n=3 to 5) ± standard error.

Table 14 Values of fitted parameters, cumulative PAR absorbed, root mean square error, bias and PAR land equivalent ratio calculated from the logistic model: $F_{PARa} = F_{PAR\max} \times \frac{\exp(K1 \times (t - K2))}{1 + \exp(K1 \times (t - K2))}$ for the whole intercrop (IC), pea sole crop (P SC) and wheat sole crop (W SC) for the different N treatments (Nx where 'x' represents N applied in kg N ha^{-1}).

Table 15 Description of the different N treatments: i) previous crop and amount of fertilizer-N, ii) initial mineral N on 0-120 cm, iii) stages (Zadoks scale) and amount of fertilizer-N application and iv) estimated mineral N available.

Table 16 Comparative absolute growth rate (CGR) calculated in intercrops for the time interval: sowing to the beginning of pea flowering (BPF), BPF to wheat flowering (WF), WF to harvest (Harvest) the different N treatments and wheat cultivars. Values are the mean (n=3 to 4) ± standard error. Single plus (+) and single asterisk (*) indicate that CGR are significantly different from 1 at P=0.10 and P=0.05 respectively.

Table 17 Grain yield (t ha^{-1}) for the sole crops (SC), the half density sole crops (SC1/2) and the intercrops (IC) for the different N treatments and wheat cultivars. Values are the mean (n=3 to 5) ± standard error.

Table 18 Number of plants m^{-2}, number of tillers per plant, number of tillers m^{-2}, dry weight per 1000 tillers (g), number of ears m^{-2}, number of grains m^{-2} and one thousand grain weight as a function of the wheat cultivar (mean of N treatments) or as function of the N treatment (mean of wheat cultivars) for the different cropping systems (intercrop: IC, sole crop: SC and half density sole crop: SC1/2). Values are the mean (n=12 to 16) ± standard error. For each variable, different superscript letters within the same cropping system indicate statistically significant differences at P=0.10 between wheat cultivars or N treatments and different suffix numbers within the same wheat cultivar or N treatment indicate statistically significant difference at P=0.10 between cropping system.

CHAPITRE V : CONCEPTION PAR EXPERTISE ET EVALUATION DE PROTOTYPES D'ITINERAIRES TECHNIQUES D'ASSOCIATIONS BLE DUR – LEGUMINEUSES A GRAINES

Tableau 19 Description des traitements expérimentaux évalués en 2007-2008 : culture, variétés, date de semis, conduite, structure du couvert (B : Blé dur, P : Pois d'hiver, F : Féverole d'hiver), identifiant, densité semis (grains m^{-2}), densité observée (plantes m^{-2}), fertilisation (kg N ha^{-1}), traitement de semence, désherbage (chimique ou mécanique), insecticide, fongicide et nombre de répétitions par traitement.

Tableau 20 Description des références utilisées pour le calcul du Land Equivalent Ratio (LER) pour les différentes associations et conséquence sur l'estimation des LER partiels du blé dur (LER_{BD}) et de la légumineuse (LER_L) et sur le LER total.

Tableau 21 Teneur en protéines du blé dur, du pois d'hiver et de la féverole d'hiver en culture « pure » ou en association pour les différents itinéraires techniques. Les valeurs sont la moyenne de n=3 à 6 ± écart type.

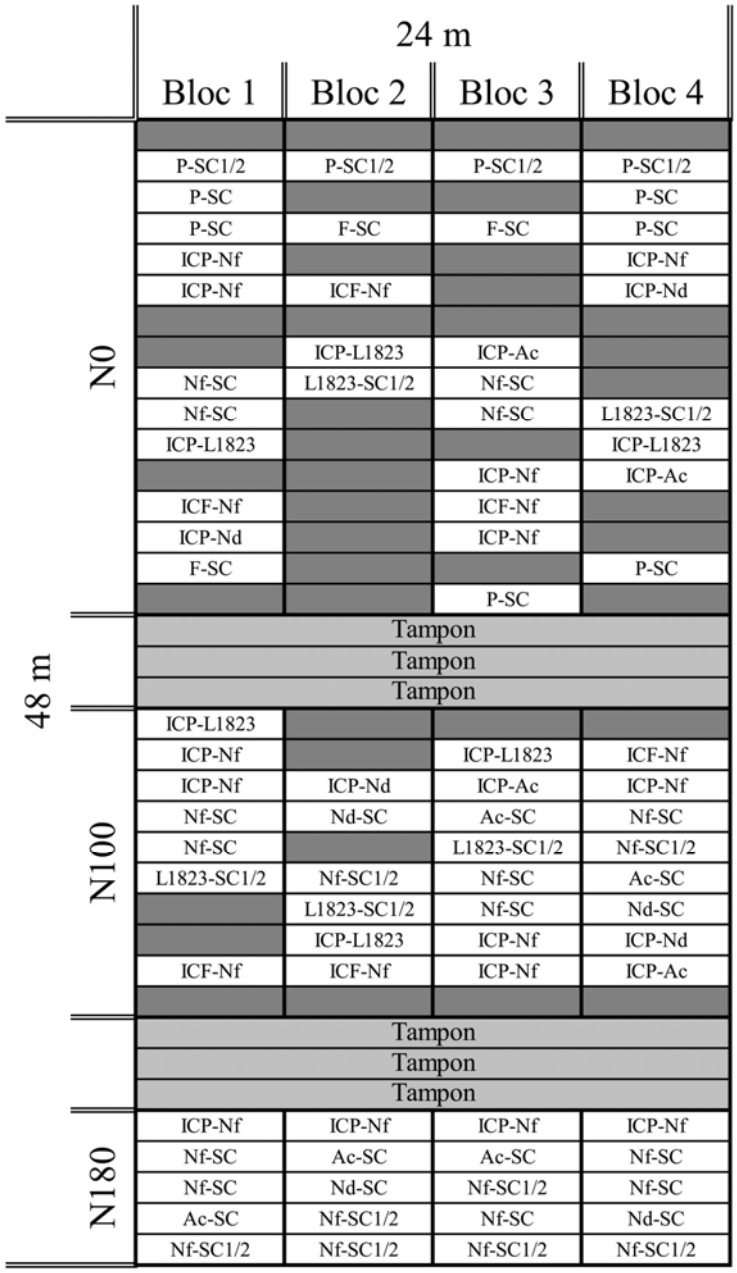
Tableau 22 Land equivalent ratio calculés à partir des marges directes (€ ha^{-1}) pour les différentes associations en comparant : i) 1 ha d'association avec 1 ha de blé dur ($LER_{MD\text{-}BD}$) ou 1 ha de légumineuse ($LER_{MD\text{-}Leg}$), ii) 2 ha d'association avec 1 ha de blé dur et 1 ha de légumineuse ($LER_{MD\text{-}1:1}$), iii) 3 ha d'association avec 2 ha de blé dur et 1 ha de légumineuse ($LER_{MD\text{-}2:1}$) ou avec 1 ha de blé dur et 2 ha de légumineuse ($LER_{MD\text{-}1:2}$) et iv) 4 ha d'association avec 3 ha de blé dur et 1 ha de légumineuse ($LER_{MD\text{-}3:1}$) ou avec 1 ha de blé dur et 3 ha de légumineuse ($LER_{MD\text{-}1:3}$). Dans le cas de l'association blé dur – féverole d'hiver N0P1 la référence blé dur est le traitement N75P2.

Tableau 23 Land equivalent ratio calculés à partir des marges directes (€ ha^{-1}) pour les différentes associations en comparant : i) 1 ha d'association avec 1 ha de blé dur (LER_{MD-BD}) ou 1 ha de légumineuse (LER_{MD-Leg}) ou 1 ha de légumineuse, ii) 2 ha d'association avec 1 ha de blé dur et 1 ha de légumineuse ($LER_{MD-1:1}$), iii) 3 ha d'association avec 2 ha de blé dur et 1 ha de légumineuse ($LER_{MD-2:1}$) ou avec 1 ha de blé dur et 2 ha de légumineuse ($LER_{MD-1:2}$) et iv) 4 ha d'association avec 3 ha de blé dur et 1 ha de légumineuse ($LER_{MD-3:1}$) ou avec 1 ha de blé dur et 3 ha de légumineuse ($LER_{MD-1:3}$). Dans le cas de l'association blé dur – féverole d'hiver N0P1 la référence blé dur est le traitement N75P2.

Tableau 24 Synthèse des aspects positifs (+), négatifs (-), neutres (=) ou indéterminés (?) des prototypes d'itinéraires techniques de cultures associées testés vis-à-vis du rendement, de l'azote accumulé, de la teneur en protéines du blé dur, de la septoriose du blé dur, de l'anthracnose du pois d'hiver et de la féverole d'hiver, des sitones et des pucerons.

ANNEXES

Annexe I. Plan expérimental 2005-2006



08/11/05
Semis du blé dur, du pois d'hiver et de la féverole d'hiver
Roulage

09/11/05
Désherbage (Linuron 1000g ha^{-1} et Trifluraline 1200 g ha^{-1})

08/02/06
Fertilisation azotée :
30 kg N ha^{-1} (N180)

03/04/06
Fertilisation azotée :
50 kg N ha^{-1} (N100)
et 100 kg N ha^{-1} (N180)

03/05/06
Fertilisation azotée :
50 kg N ha^{-1} (N100 et N180)

10/05/06
Insecticide (Lambda-cyhalothrine 6.25 g ha^{-1})

18/05/06
Fongicide (Metconazole 72 g ha^{-1})
Insecticide (Tau-fluvalinate 48 g ha^{-1})

13/06/06
Récolte Pois d'hiver en culture « pure »

04/07/06
Récolte associations Blé dur – Pois d'hiver et Blé dur – Féverole d'hiver et Blé dur en culture « pure »

Culture	Variétés	Structure du couvert	Identifiant	Densité semis (grains m^{-2})	Densité observée (plante m^{-2})	Répétitions N0	Répétitions N100	Répétitions N180	Total
Blé pur	Nefer	BBBBBBBBBBB	Nf-SC	336	226	4	5	5	14
		B B B B B B	Nf-SC1/2	168	111	-	2	6	8
	Neodur	BBBBBBBBBBB	Nd-SC	336	229	-	2	2	4
	Acalou	BBBBBBBBBBB	Ac-SC	336	112	-	2	3	5
	L1823	B B B B B B	L1823-SC	168	102	2	3	-	5
Pois pur	Lucy	P P P P P P	P-SC	72	51	6	-	-	6
			P-SC1/2	36	27	4	-	-	4
Féverole pure	Castel	F F F F F F	F-SC	30	26	3	-	-	3
Association Blé / Pois	Nefer / Lucy	BPBPBPBPBPB	ICP-Nf	168 / 36	112 / 27	5	5	4	14
	Neodur / Lucy		ICP-Nd		114 / 26	2	2	-	4
	Acalou / Lucy		ICP-Ac		53 / 26	2	2	-	4
	L1823 / Lucy		ICP-L1823		103 / 27	3	3	-	6
Association Blé / Féverole	Nefer / Castel	BFB BFB BFB	ICF-Nf	168 / 15	112 / 13	3	3	-	6
Total						34	29	20	83

Annexe II. Plan expérimental 2006-2007

09/11/06 Semis du blé dur, du pois d'hiver et de la féverole d'hiver

13/11/06 Roulage ; Irrigation (20 mm)
Désherbage (Trifluraline 900 g ha^{-1} et Linuron 450 g ha^{-1})

29/11/06 Roulage

06/03/07 Fertilisation azotée : 80 kg N ha^{-1} (N80 et N140)

25/04/07 Fongicide (Metconazole 90 g ha^{-1})

26/04/07 Fertilisation azotée : 60 kg N ha^{-1} (N60+ et N140)

11/05/07 Fongicide (Metconazole 90 g ha^{-1})

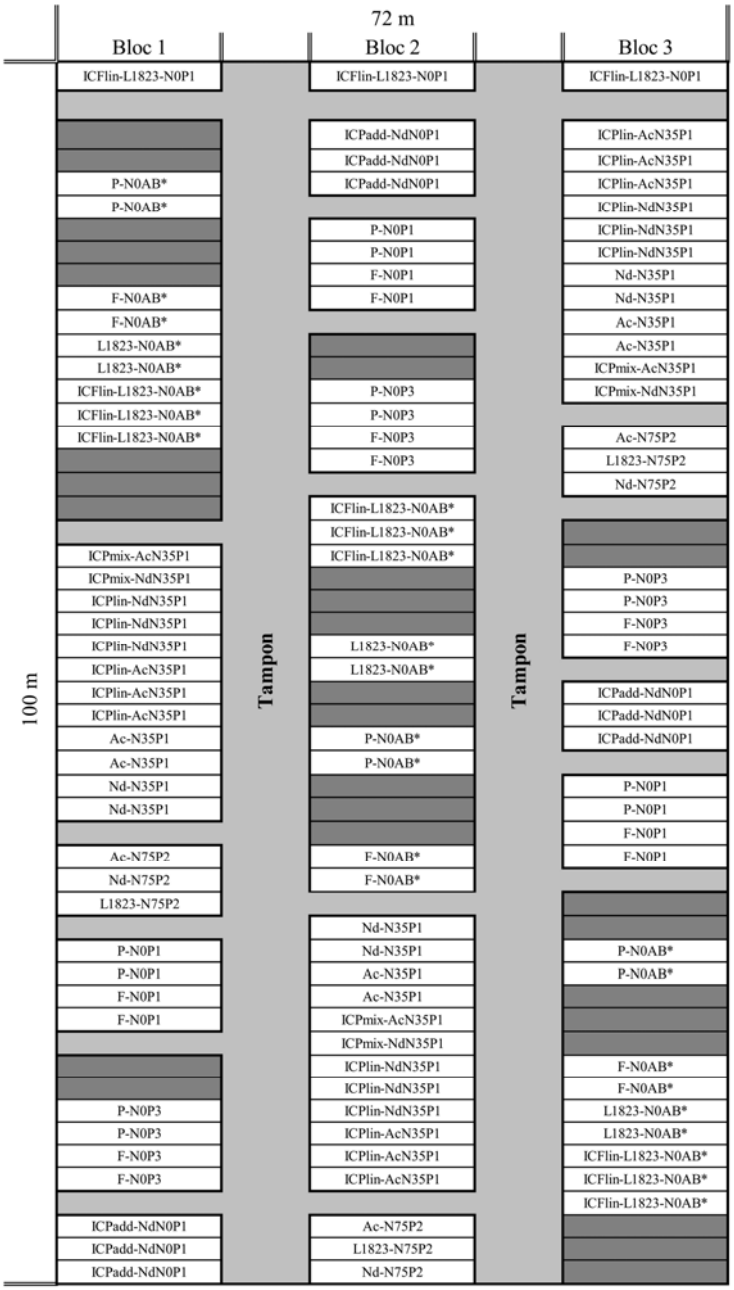
06/06/07 Récolte Pois d'hiver en culture « pure »

10/07/07 Récolte associations Blé dur – Pois d'hiver et blé dur « pur »

13/07/07 Récolte Blé dur et Féverole d'hiver en association et en « pur »

Culture	Variétés	Structure du couvert	Identifiant	Densité semis (grains m^{-2})	Densité observée (plante m^{-2})	Répétitions				Total
						N0	N60+	N80	N140	
Blé pur	Nefer	BBBBBBBBBBB	Nf-SC	336	203	4	3	3	3	13
		B B B B B B	Nf-SC1/2	168	101	4	3	3	3	13
	Neodur	BBBBBBBBBBB	Nd-SC	336	186	4	3	3	3	13
		B B B B B B	Nd-SC1/2	168	92	4	3	3	3	13
	Acalou	BBBBBBBBBBB	Ac-SC	336	170	4	3	3	3	13
		B B B B B B	Ac-SC1/2	168	84	4	3	3	3	13
	Orjaune	BBBBBBBBBBB	Oj-SC	336	227	4	3	3	3	13
		B B B B B B	Oj-SC1/2	168	112	4	3	3	3	13
Pois pur	Lucy	PPPPPPPPPPP	P-SC	72	56	5	-	-	-	5
		P P P P P P	P-SC1/2	36	28	5	-	-	-	5
Féverole pure	Castel	FFFFFFFFFFF	F-SC	30	46	7	-	-	-	7
		F F F F F F	F-SC1/2	15	23	7	-	-	-	7
Association Blé / Pois	Nefer / Lucy	BPBPBPBPBPB	ICP-Nf	168 / 36	101 / 27	4	3	3	3	13
	Neodur / Lucy		ICP-Nd		93 / 27	4	3	3	3	13
	Acalou / Lucy		ICP-Ac		85 / 27	4	3	3	3	13
	Orjaune / Lucy		ICP-Oj		113 / 27	4	3	3	3	13
Association Blé / Féverole	Nefer / Castel	BFBFBFBFBFB	ICF-Nf	168 / 15	101 / 23	4	3	3	3	13
	Neodur / Castel		ICF-Nd		93 / 23	4	3	3	3	13
	Acalou / Castel		ICF-Ac		84 / 23	4	3	3	3	13
	Orjaune / Castel		ICF-Oj		112 / 23	4	3	3	3	13
Total						88	48	48	48	232

Annexe III. Plan expérimental 2007-2008



07/11/07
Semis du blé dur, du pois d'hiver et de la féverole d'hiver

08/11/07
Roulage

09/11/07
Désherbage (Trifluraline 900 g ha^{-1} et Linuron 450 g ha^{-1}) sur P1, P2 et P3

19/12/07
Semis décalé du blé dur et du pois d'hiver

21/12/07
Roulage sur parcelles semées tardivement

29/01/08
Désherbage herse étrille (N0AB*)

11/02/08
Désherbage herse étrille (N0AB*)

18/03/08
Fertilisation azotée (ammonitrate 33.5) 40 kg N ha^{-1} sur blé dur N75

19/03/08
Insecticide (Lambda-cyhalothrine 6.25 g ha^{-1}) sur légumineuses P3

09/04/08
Fongicide (Fenpropimorphe 375 g ha^{-1} Epoxiconazole 126 g ha^{-1}) blé dur P2

07/05/08
Fertilisation azotée : 35 kg N ha^{-1} sur N35 et N75

13/05/08
Fongicide (Metconazole 90 g ha^{-1}) sur blé dur P2 et légumineuses P3

19/06/08
Récolte Pois d'hiver en culture « pure »

15/07/08
Récolte associations Blé dur – Pois d'hiver et Blé dur – Féverole d'hiver et Blé dur en culture « pure »

Culture	Variétés	Date semis	Structure du couvert	Identifiant	Densité semis (grains m^{-2})	Densité observée (plante m^{-2})	Fertilisation (kg N ha^{-1})	Traitement semences	Desherbage	Insecticide	Fongicide	Répétitions
Blé pur	Neodur	07/11/07	BBBBBBBBBBB	Nd-N75P2	336	230	40 + 35	Oui	Chimique	Non	x 2	3
				Nd-N35P1	336	216	35	Oui	Chimique	Non	Non	6
	Acalou	19/12/07	BBBBBBBBBBB	Ac-N75P2	336	207	40 + 35	Oui	Chimique	Non	x 2	3
				Ac-N35P1	336	244	35	Oui	Chimique	Non	Non	6
	L1823	07/11/07	BBBBBBBBBBB	L1823-N75P2	336	239	40 + 35	Oui	Chimique	Non	x 2	3
				L1823-N0AB*	420	125	0	Non	Herse Etrille x 2	Non	Non	6
Pois pur	Lucy	07/11/07	P P P P P P	P-N0P3	72	58	0	Oui	Chimique	x 1	x 1	6
				P-N0P1	72	59	0	Oui	Chimique	Non	Non	6
				P-N0AB*	90	75	0	Non	Herse Etrille x 2	Non	Non	6
Féverole pure	Castel	07/11/07	F F F F F F	F-N0P3	30	24	0	Oui	Chimique	x 1	x 1	6
				F-N0P1	30	24	0	Oui	Chimique	Non	Non	6
				F-N0AB*	37	25	0	Non	Herse Etrille x 2	Non	Non	6
Association Blé / Pois	Neodur / Lucy	07/11/07	Mélange sur le rang	ICPmix-NdN35P1	168 / 36	95 / 28	35	Oui	Chimique	Non	Non	3
			BPBPBPBPBPB	ICPlin-NdN35P1	168 / 36	109 / 30	35	Oui	Chimique	Non	Non	9
			PBPBPBPBPBP	ICPadd-NdN0P1	168 / 72	109 / 59	0	Oui	Chimique	Non	Non	9
	Acalou / Lucy	19/12/07	Mélange sur le rang	ICPmix-AcN35P1	168 / 36	85 / 9	35	Oui	Chimique	Non	Non	3
			BPBPBPBPBPB	ICPlin-AcN35P1	168 / 36	138 / 32	35	Oui	Chimique	Non	Non	9
Association Blé / Féverole	L1823 / Castel	07/11/07	BFB BFB BFB	ICFlin-L1823N0P1	168 / 15	119 / 12	0	Oui	Chimique	Non	Non	3
				ICFlin-L1823N0AB*	210 / 18	59 / 12	0	Non	Herse Etrille x2	Non	Non	9
Total												108

Annexe IV. Calculs

Y_{W-IC} intercropped wheat yield per unit area ; Y_{P-IC} intercropped pea yield per unit area.

Y_{W-SC} sole cropped wheat yield per unit area ; Y_{P-SC} sole cropped pea yield per unit area.

D_{W-IC} sowing density of the intercropped wheat ; D_{P-IC} sowing density of the intercropped pea.

D_{W-SC} sowing density of the sole cropped wheat ; D_{P-SC} sowing density of the sole cropped pea.

$D_{IC} = D_{W-IC} + D_{P-IC}$ sowing density of the whole intercrop.

$R_{W-IC} = \frac{D_{W-IC}}{D_{IC}}$ sowing proportion (based on seed numbers) of wheat in the mixture.

$R_{P-IC} = \frac{D_{P-IC}}{D_{IC}}$ sowing proportion (based on seed numbers) of pea in the mixture.

$Y'_{W-SC} = Y_{W-SC} \times \frac{D_{IC}}{D_{W-SC}}$ sole cropped wheat yield per unit area corrected to represent yield at an overall density equal to that of the whole intercrop.

$Y'_{P-SC} = Y_{P-SC} \times \frac{D_{IC}}{D_{P-SC}}$ sole cropped pea yield per unit area corrected to represent yield at an overall density equal to that of the whole intercrop.

$Y'_{W-SC1/2} = Y_{W-SC1/2} \times \frac{D_{IC}}{D_{W-SC1/2}}$ half density sole cropped wheat yield per unit area corrected to represent yield at an overall density equal to that of the whole intercrop.

$Y''_{W-SC} = Y_{W-SC} \times \frac{D_{W-IC}}{D_{W-SC}}$ sole cropped wheat yield per unit area corrected to represent yield at a density equal to that of the species in the mixture.

$Y''_{P-SC} = Y_{P-SC} \times \frac{D_{P-IC}}{D_{P-SC}}$ sole cropped pea yield per unit area corrected to represent yield at a density equal to that of the species in the mixture.

$Y''_{W-SC1/2} = Y_{W-SC1/2} \times \frac{D_{W-SC}}{D_{W-SC1/2}}$ half density sole cropped wheat yield per unit area corrected to represent yield at an overall density equal to that of sole cropped wheat at normal density.

Annexe IV. Appendix I

$$AG_W = \frac{Y_{W-IC}}{R_{W-IC} \times Y'_{W-SC}} - \frac{Y_{P-IC}}{R_{P-IC} \times Y'_{P-SC}}$$

$$\Leftrightarrow AG_W = \frac{Y_{W-IC}}{\frac{D_{W-IC}}{D_{IC}} \times Y_{W-SC} \times \frac{D_{IC}}{D_{W-SC}}} - \frac{Y_{P-IC}}{\frac{D_{P-IC}}{D_{IC}} \times Y_{P-SC} \times \frac{D_{IC}}{D_{P-SC}}}$$

$$\Leftrightarrow AG_W = \frac{Y_{W-IC}}{\frac{D_{W-IC}}{D_{W-SC}} \times Y_{W-SC}} - \frac{Y_{P-IC}}{\frac{D_{P-IC}}{D_{P-SC}} \times Y_{P-SC}}$$

In our experiment $\frac{D_{W-IC}}{D_{W-SC}} = \frac{D_{P-IC}}{D_{P-SC}} = 0.5$ because each species was sown in intercrop at half of its sole crop density.

$$\Leftrightarrow AG_W = \frac{Y_{W-IC}}{0.5 \times Y_{W-SC}} - \frac{Y_{P-IC}}{0.5 \times Y_{P-SC}} \Leftrightarrow AG_W = 2 \times (LER_{Y-W} - LER_{Y-P})$$

Annexe IV. Appendix II

$$AG'_W = \frac{Y_{W-IC}}{R_{W-IC} \times Y''_{W-SC}} - \frac{Y_{P-IC}}{R_{P-IC} \times Y''_{P-SC}}$$

$$\Leftrightarrow AG'_W = \frac{Y_{W-IC}}{R_{W-IC} \times Y_{W-SC} \times \frac{D_{W-IC}}{D_{W-SC}}} - \frac{Y_{P-IC}}{R_{P-IC} \times Y_{P-SC} \times \frac{D_{P-IC}}{D_{P-SC}}}$$

In our experiment $\frac{D_{W-IC}}{D_{W-SC}} = \frac{D_{P-IC}}{D_{P-SC}} = 0.5$ because each species was sown in intercrop at half of its sole crop density.

$$\Leftrightarrow AG'_W = \frac{Y_{W-IC}}{0.5 \times R_{W-IC} \times Y_{W-SC}} - \frac{Y_{P-IC}}{0.5 \times R_{P-IC} \times Y_{P-SC}} \Leftrightarrow AG'_W = 2 \times (\frac{LER_{Y-W}}{R_{W-IC}} - \frac{LER_{Y-P}}{R_{P-IC}})$$

Annexe IV. Appendix III

$$CC_W = \frac{\frac{Y_{W-IC}}{Y_{IC}}}{\frac{Y'_{W-SC} \times R_{W-IC}}{Y'_{W-SC} \times R_{W-IC} + Y'_{P-SC} \times R_{P-IC}}} - 1$$

$$\Leftrightarrow CC_W = \frac{\frac{Y_{W-IC}}{Y_{IC}}}{\frac{Y_{W-SC} \times \frac{D_{IC}}{D_{W-SC}} \times \frac{D_{W-IC}}{D_{IC}}}{Y_{W-SC} \times \frac{D_{IC}}{D_{W-SC}} \times \frac{D_{W-IC}}{D_{IC}} + Y_{P-SC} \times \frac{D_{IC}}{D_{P-SC}} \times \frac{D_{P-IC}}{D_{IC}}}} - 1$$

$$\Leftrightarrow CC_W = \frac{\frac{Y_{W-IC}}{Y_{IC}}}{\frac{Y_{W-SC} \times \frac{D_{W-IC}}{D_{W-SC}}}{Y_{W-SC} \times \frac{D_{W-IC}}{D_{W-SC}} + Y_{P-SC} \times \frac{D_{P-IC}}{D_{P-SC}}}} - 1$$

In our experiment $\frac{D_{W-IC}}{D_{W-SC}} = \frac{D_{P-IC}}{D_{P-SC}}$ because each species was sown in intercrop at half of its sole crop density.

$$\Leftrightarrow CC_W = \frac{\frac{Y_{W-IC}}{Y_{IC}}}{\frac{Y_{W-SC}}{Y_{W-SC} + Y_{P-SC}}} - 1$$

Annexe IV. Appendix IV

$$CC_W = \frac{\frac{Y_{W-IC}}{Y_{IC}}}{\frac{Y_{W-SC}}{Y_{W-SC} + Y_{P-SC}}} - 1$$

$$\Leftrightarrow CC_W + 1 = \frac{\frac{Y_{W-IC}}{Y_{IC}}}{\frac{Y_{W-SC}}{Y_{W-SC} + Y_{P-SC}}}$$

$$\Leftrightarrow (CC_W + 1) \times \frac{Y_{W-SC}}{Y_{W-IC}} = \frac{\frac{1}{Y_{IC}}}{\frac{1}{Y_{W-SC} + Y_{P-SC}}}$$

$$\Leftrightarrow (CC_W + 1) \times \frac{Y_{W-SC}}{Y_{W-IC}} \times \frac{Y_{P-IC}}{Y_{P-SC}} = \frac{\frac{Y_{P-IC}}{Y_{IC}}}{\frac{Y_{P-SC}}{Y_{W-SC} + Y_{P-SC}}}$$

$$\Leftrightarrow (CC_W + 1) \times \frac{Y_{W-SC}}{Y_{W-IC}} \times \frac{Y_{P-IC}}{Y_{P-SC}} - 1 = \frac{\frac{Y_{P-IC}}{Y_{IC}}}{\frac{Y_{P-SC}}{Y_{W-SC} + Y_{P-SC}}} - 1$$

$$\Leftrightarrow (CC_W + 1) \times \frac{LER_{Y-P}}{LER_{Y-W}} - 1 = CC_P$$

Annexe IV. Appendix V

$$CC_W > 0$$

$$\Leftrightarrow \frac{\frac{Y_{W-IC}}{Y_{IC}}}{\frac{Y_{W-SC}}{Y_{W-SC}+Y_{P-SC}}} > 1$$

$$\Leftrightarrow \frac{Y_{W-IC}}{Y_{IC}} \times \frac{Y_{W-SC}+Y_{P-SC}}{Y_{W-SC}} > 1 \text{ therefore } \frac{Y_{IC}}{Y_{W-IC}} > 0$$

$$\Leftrightarrow \frac{Y_{W-SC}+Y_{P-SC}}{Y_{W-SC}} > \frac{Y_{IC}}{Y_{W-IC}} \text{ with } Y_{IC} = Y_{W-IC} + Y_{P-IC}$$

$$\Leftrightarrow \frac{Y_{W-SC}+Y_{P-SC}}{Y_{W-SC}} > \frac{Y_{W-IC}+Y_{P-IC}}{Y_{W-IC}}$$

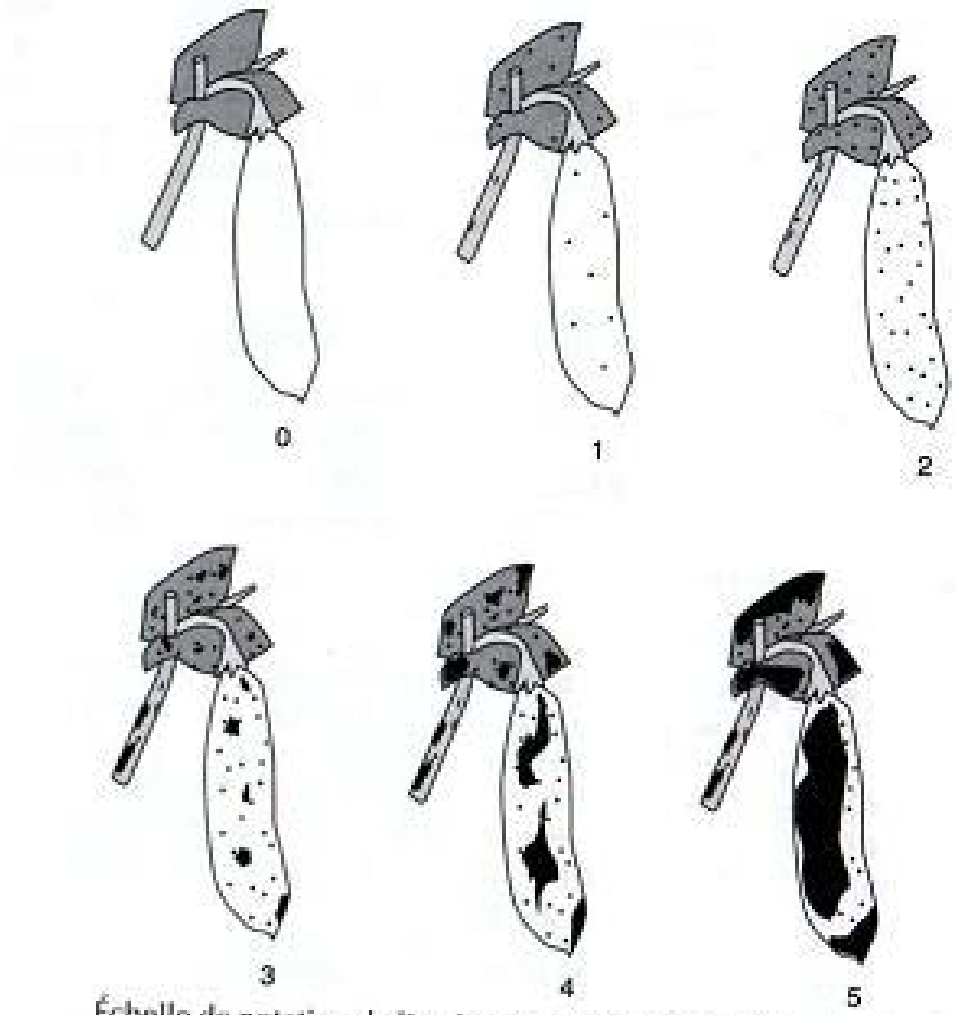
$$\Leftrightarrow 1 + \frac{Y_{P-SC}}{Y_{W-SC}} > 1 + \frac{Y_{P-IC}}{Y_{W-IC}}$$

$$\Leftrightarrow \frac{Y_{P-SC}}{Y_{W-SC}} > \frac{Y_{P-IC}}{Y_{W-IC}} \text{ therefore } \frac{Y_{W-IC}}{Y_{P-SC}} > 0$$

$$\Leftrightarrow \frac{Y_{W-IC}}{Y_{W-SC}} > \frac{Y_{P-IC}}{Y_{P-SC}}$$

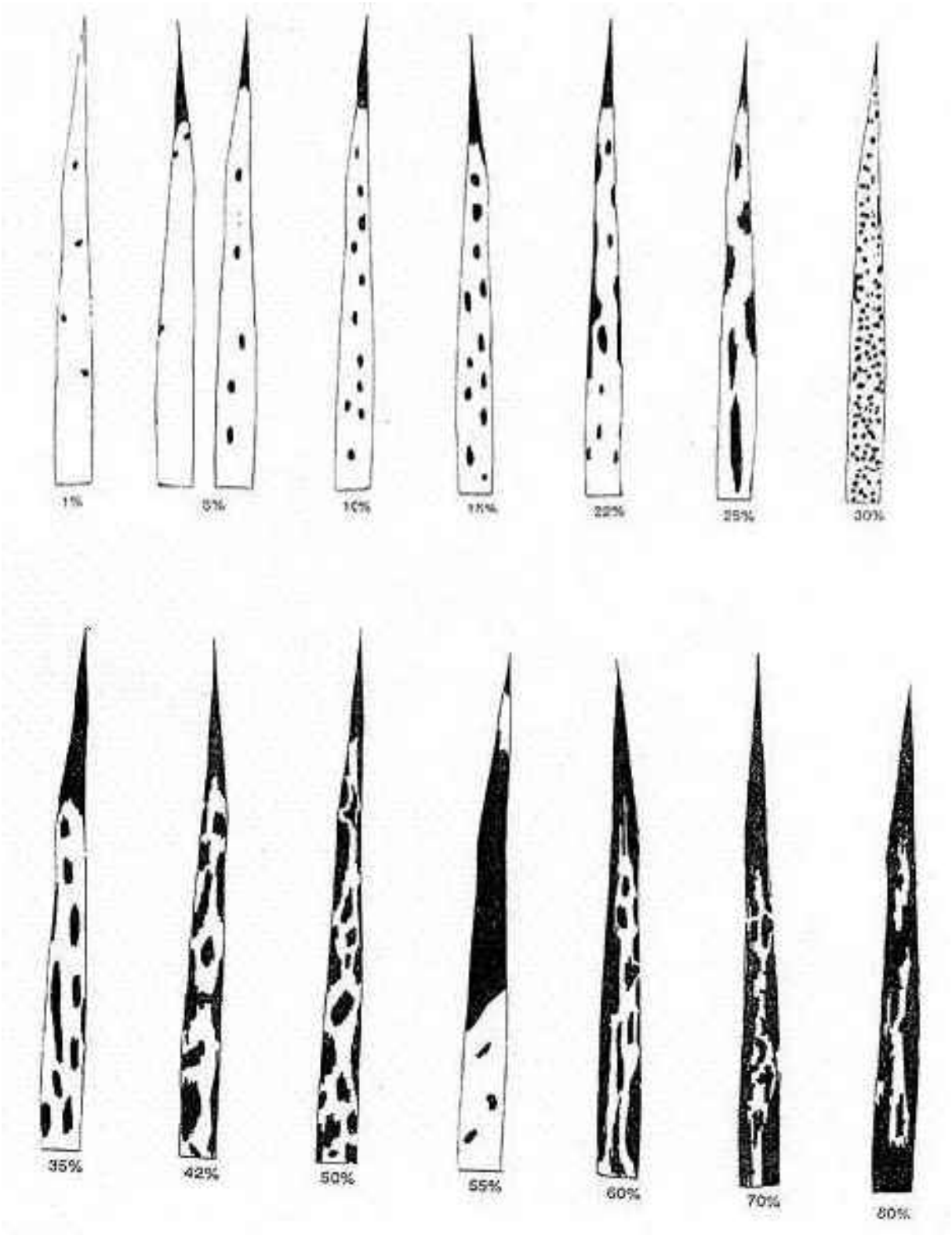
$$\Leftrightarrow LER_{Y-W} > LER_{Y-P}$$

Annexe V. Abaque de détermination de la surface des feuilles et gousses malades du pois d'hiver et de la féverole d'hiver (Tivoli 1994)



Échelle de notation de l'anthracnose du pois due à *M. pinodes* (Tivoli, 1994).

Annexe VI. Abaque de détermination de la surface des feuilles malades du blé dur (Arvalis institut du végétal)



Annexe VII. Grilles de calcul des bonus et malus sur la qualité du blé dur en systèmes conventionnels et biologiques

Grille poids spécifique (PS) :

Rq : Pour les systèmes conventionnels et agriculture biologiques

PS ≥ 78 kg hl^{-1}	→ pas de malus
78 kg hl^{-1} > PS ≥ 77 kg hl^{-1}	→ -1.83 € t^{-1} $point_{<78}^{-1}$
77 kg hl^{-1} > PS ≥ 74 kg hl^{-1}	→ -1.30 € t^{-1} $point_{<78}^{-1}$
74 kg hl^{-1} > PS ≥ 69 kg hl^{-1}	→ -3.30 € t^{-1} $point_{<78}^{-1}$
69 kg hl^{-1} > PS	→ -30 € t^{-1}

Grille mitadinage (Mit) :

Rq : Pour les systèmes conventionnels uniquement

25% ≥ Mit	→ pas de malus
30% ≥ Mit > 25%	→ -0.5 € t^{-1} $point_{>25}^{-1}$
60% ≥ Mit > 30%	→ -0.7 € t^{-1} $point_{>25}^{-1}$
Mit > 60%	→ -30 € t^{-1}

Grille agriculture biologique :

Rq : Fonction de la teneur en protéines (Prot) et du mitadinage (Mit)

10% ≥ Prot	→ pas de bonus
12% ≥ Prot > 10%	→ +20 € t^{-1} $point_{>10}^{-1}$
Prot > 12% et Mit ≥ 25%	→ +45 € t^{-1} + 20 € t^{-1} $point_{>12}^{-1}$ avec max 85 € t^{-1}
Prot > 12% et 25% > Mit	→ +85 € t^{-1} + 20 € t^{-1} $point_{>12}^{-1}$ avec max 135 € t^{-1}

AUTHOR: BEDOUSSAC Laurent

TITLE: ANALYSIS OF THE FUNCTIONING AND EFFICIENCY OF DURUM WHEAT – WINTER PEA AND DURUM WHEAT – WINTER FABA BEAN INTERCROPS IN ORDER TO DESIGN CROPPING SYSTEMS

PHD DIRECTORS: JUSTES Eric and WALLACH Daniel

PLACE AND DATE OF DEFENCE: TOULOUSE, SEPTEMBRE 29TH 2009

SUMMARY:

Intercropping is the simultaneous growing of two or more species in the same field for a significant period. Such systems are known to use available resources (water, light, nitrogen…) more efficiently than their corresponding sole crops and consequently to increase yield and grain protein concentration particularly in low N input systems.

The aim of our work was to analyse the functioning of durum wheat – winter pea and durum wheat – winter faba bean intercrops. A 3-year field experiment was carried out with different fertilizer-N levels, wheat cultivars and plant densities. The intercrop efficiency was studied in order to further design low inputs cropping systems for specific objectives.

Our results confirm that intercropping is more suited to low-N-input systems because it takes advantage of complementary N sources (soil mineral N and N_2 fixation) and light use between species of the intercrop. Thus, intercrops were more efficient than sole crops for yield, they increased durum wheat grain protein concentration and in certain cases reduced weeds, pests and diseases.

Finally, our work indicates that intercrops can be optimized for specific objectives by the choice of crop species, cultivars, N fertilization and plant densities in order to maximize resource capture and minimize competition. Indeed, intercrop efficiency is determined by the complementary resource use between the two species as well as the relative strength of the intra- and interspecific dynamic competitive interactions.

KEY-WORDS: Grain Yield, Grain Protein Content, Land Equivalent Ratio, Nitrogen, Symbiotic Fixation, Light, Nitrogen Status, Growth Dynamic, Competition, Complementarity, Intraspecific, Interspecific, Weeds, Pests, Diseases

DISCIPLINE: AGROSYSTEMS, ECOSYSTEMS AND ENVIRONMENT

LABORATORY: INRA, UMR 1248 AGIR, EQUIPE VASCO

AUTEUR : BEDOUSSAC Laurent

TITRE : ANALYSE DU FONCTIONNEMENT DES PERFORMANCES DES ASSOCIATIONS BLE DUR-POIS D'HIVER ET BLE DUR-FEVEROLE D'HIVER POUR LA CONCEPTION D'ITINERAIRES TECHNIQUES ADAPTES A DIFFERENTS OBJECTIFS DE PRODUCTION EN SYSTEMES BAS-INTRANTS

DIRECTEURS DE THESE : JUSTES Eric et WALLACH Daniel

LIEU ET DATE DE SOUTENANCE : TOULOUSE, LE 29 SEPTEMBRE 2009

RESUME :

Les associations d'espèces sont définies comme la culture simultanée d'au moins deux espèces sur la même parcelle pendant une période significative de leur croissance. Ce système permettrait d'améliorer l'utilisation des ressources du milieu (eau, azote, lumière…) et ainsi d'augmenter le rendement et la qualité des grains par rapport aux cultures monospécifiques.

L'objectif de notre travail était d'analyser le fonctionnement et d'évaluer la performance des associations blé dur – pois d'hiver et blé dur – féverole d'hiver pour aider à la conception d'itinéraires techniques adaptés à différents objectifs de production. Pour cela nous avons testé, au cours de trois années d'expérimentations, différentes combinaisons de variétés de blé dur, disponibilités en azote, structures de couverts et densités de plantes.

Nos résultats ont confirmé l'intérêt de ces systèmes pour améliorer le rendement et la teneur en protéines du blé dur comparativement aux cultures monospécifiques mais également pour la réduction des ravageurs, maladies et de l'enherbement dans certaines conditions. Ces systèmes sont ainsi particulièrement bien adaptés aux situations à faible disponibilité en azote en raison de la complémentarité entre céréale et légumineuse pour l'utilisation de l'azote (minéral du sol et fixation symbiotique) mais aussi pour la captation de l'énergie lumineuse.

In fine, ce travail a permis de proposer des prototypes d'itinéraires techniques d'associations adaptés à différents objectifs de production, grâce notamment à l'analyse dynamique des compétitions et complémentarités entre espèces au sein du couvert et en particulier de l'élaboration du rendement du blé dur en association.

MOTS CLES : Rendement, Protéine, Land Equivalent Ratio, Azote, Fixation Symbiotique, Lumière, Statut Azoté, Croissance Dynamique, Compétition, Complémentarité, Intraspécifique, Interspécifique, Adventices, Ravageurs, Maladies

DISCIPLINE : AGROSYSTEMES, ECOSYSTEMES ET ENVIRONNEMENT

UNITE DE RECHERCHE : INRA, UMR 1248 AGIR, EQUIPE VASCO