

université  
PARIS-SACLAY

AgroParisTech  
INSTITUT DES SCIENCES ET INDUSTRIES DU VIVANT ET DE L'ENVIRONNEMENT  
PARIS INSTITUTE OF TECHNOLOGY FOR LIFE, FOOD AND ENVIRONMENTAL SCIENCES

esa  
ÉCOLE SUPÉRIEURE  
D'AGRICULTURES  
Angers Loire

esa  
ÉCOLE SUPÉRIEURE  
D'AGRICULTURES  
Angers Loire

LEG-TIMES  
LEGume Inertion in Territories to  
Induce Main Ecosystem Services

## Mémoire

présenté par

**Xavier BOUSSELIN**

Master Agrosiences, Environnement, Territoires, Paysage, Forêt  
Parcours « De l'Agronomie à l'Agroécologie »

## Variabilité des effets précédents du lupin sur le blé

Pour l'obtention du diplôme de  
Master Agrosiences, Environnement, Territoires, Paysage, Forêt  
et du diplôme  
d'Ingénieur en Agriculture de l'Ecole Supérieure d'Agricultures

Enseignant responsable du stage : Antoine GARDARIN

Maître de stage : Guénaëlle HELLOU

Soutenu le 7 juillet 2017



## Engagement de non plagiat

### ① Principes

- Le plagiat se définit comme l'action d'un individu qui présente comme sien ce qu'il a pris à autrui.
- Le plagiat de tout ou parties de documents existants constitue une violation des droits d'auteur ainsi qu'une fraude caractérisée
- Le plagiat concerne entre autres : des phrases, une partie d'un document, des données, des tableaux, des graphiques, des images et illustrations.
- Le plagiat se situe plus particulièrement à deux niveaux : Ne pas citer la provenance du texte que l'on utilise, ce qui revient à le faire passer pour sien de manière passive. Recopier quasi intégralement un texte ou une partie de texte, sans véritable contribution personnelle, même si la source est citée.

### ② Consignes

- Il est rappelé que la rédaction fait partie du travail de création d'un rapport ou d'un mémoire, en conséquence lorsque l'auteur s'appuie sur un document existant, il ne doit pas recopier les parties l'intéressant mais il doit les synthétiser, les rédiger à sa façon dans son propre texte.
- Vous devez systématiquement et correctement citer les sources des textes, parties de textes, images et autres informations reprises sur d'autres documents, trouvés sur quelque support que ce soit, papier ou numérique en particulier sur internet.
- Vous êtes autorisés à reprendre d'un autre document de très courts passages in extenso, mais à la stricte condition de les faire figurer entièrement entre guillemets et bien sur d'en citer la source.

**③ Sanction** : En cas de manquement à ces consignes, le département SIAFEE se réserve le droit d'exiger la réécriture du document, dans ce cas la validation de l'Unité d'Enseignement ou du diplôme de fin d'études sera suspendue.

### ④ Engagement :

Je soussigné **Xavier Bousselin**  
Reconnaît avoir lu et m'engage à respecter les consignes de non plagiat

A Angers le 23/06/2017  
Signature :  
*Xavier Bousselin*



## Sommaire

Engagement de non plagiat .....	1
Sommaire .....	3
Table des figures .....	7
Remerciements .....	9
Summary .....	11
Résumé .....	11
Table des abréviations .....	13
Introduction .....	15
1. Cadre de l'étude.....	15
2. Bibliographie .....	17
2.1. La mise en place du rendement et de la qualité chez le blé.....	17
2.1.1. La mise en place du rendement chez le blé .....	17
2.1.2. La mise en place du taux de protéines du grain de blé .....	17
2.2. L'effet précédent sur l'azote.....	19
2.2.1. Impact du Lupin sur l'azote laissé au système .....	19
2.2.2. Facteurs de variabilité de la sensibilité du blé à l'effet précédent azote du lupin .....	23
2.3. L'effet précédent du lupin et les bioagresseurs .....	23
2.3.1. Les Adventices .....	23
2.3.2. Les autres bioagresseurs .....	25
2.4. Les autres effets du lupin sur la culture suivante.....	25
3. Problématique.....	27
4. Matériel et méthodes .....	27
4.1. Le dispositif expérimental .....	27
4.1.1. Les parcelles .....	27
4.1.2. Mesures réalisées sur le précédent.....	29
4.1.3. Mesures effectuées sur la céréale suivant le lupin.....	31
4.2. Recueil des itinéraires techniques .....	31
4.3. Analyse des données .....	31
4.3.1. Diagnostic des facteurs limitant .....	31
5. Résultats .....	35
5.1. Perceptions et pratiques des agriculteurs du réseau.....	35
5.1.1. Perception de l'effet précédent du lupin sur le blé par les agriculteurs.....	35
5.1.2. Adaptation des Itinéraires techniques.....	37
5.2. Variabilité des performances du blé après un précédent lupin .....	37
5.3. Variabilité de l'effet précédent azote.....	37



5.3.1.	Rôle de l'azote dans la variabilité des performances du blé.....	37
5.3.2.	Effet précédent du lupin pur sur la fourniture potentielle d'azote.....	39
5.3.3.	Effet précédent des différents types de lupin.....	41
5.3.4.	Effet précédent du lupin associé.....	41
5.3.5.	Sensibilité de la quantité d'azote accumulée par le blé aux variations de l'effet précédent du lupin .....	41
5.4.	Etude de l'enherbement de la céréale.....	43
5.4.1.	Variabilité de la biomasse d'adventice et son effet sur les performances du blé .....	43
5.4.2.	Facteurs influençant la biomasse d'adventice dans la céréale suivante.....	43
5.4.3.	Facteurs influençant la densité et la structure des populations d'adventice .....	43
6.	Discussion et perspectives.....	45
6.1.	Effet précédent Azote.....	45
6.1.1.	La variabilité de l'effet précédent Azote .....	45
6.1.2.	Perspectives et pratiques.....	47
6.2.	Effet précédent adventice .....	49
6.2.1.	La variabilité de l'effet précédent du lupin sur les adventices .....	49
6.2.2.	Pistes d'amélioration des pratiques .....	51
6.3.	Les autres effets précédents et leur variabilité.....	51
6.4.	Limites de l'étude et perspectives .....	51
	Conclusion.....	53
	Références .....	55
	Annexe 1 : Les années climatiques (Source : Météo France).....	65
	Annexe 2 : dispositifs dans les parcelles .....	67
	Annexe 3 : Récapitulatif des mesures (Source : Martine Mauline).....	69
	Annexe 4 : Questionnaire d'enquête sur les pratiques des agriculteurs sur le lupin et le blé suivant (Source : Martine Mauline) .....	72
	Annexe 5 : Questionnaire de diagnostic individuel des parcelles .....	81





## Table des figures

Figure 1: Relation entre itinéraire technique, climat, peuplement cultivé et milieu physique au cours de la succession lupin-blé (Adapté de Doré <i>et al.</i> , 1997).....	16
Figure 2: Effets précédents du lupin sur le milieu et sensibilité du blé qui le suit à ces effets (Adapté de Doré <i>et al.</i> , 1997; Preissel <i>et al.</i> , 2015) .....	16
Figure 3 : Schéma simplifié de la mise en place des composantes du rendement chez le blé.....	18
Figure 4 : Illustration des flux de l'azote à l'échelle dans une parcelle durant une succession lupin-blé .....	18
Figure 5 : Exemple de solde azoté d'une culture de pois d'après Voisin et Gastal (2015) (d'après UNIP, ESA, INRA, Arvalis et Mathieu <i>et al.</i> , 2007) .....	20
Figure 6 : Carte de la répartition des parcelles et des stations météo utilisées (Source : Google Earth le 01.03.2017).....	28
Figure 7 : Rendement et teneur en protéines des blé du réseau.....	34
Figure 8 : Liens entre l'azote du couvert et les composantes du rendement du blé (A, B, C) et sa teneur en protéines (D).....	36
Figure 9 : Impact de la biomasse du lupin sur la biomasse de paille (A), la teneur en azote des pailles (B) et la quantité d'azote des pailles de lupin (D) .....	38
Figure 10 : Reliquats aux semis d'une culture d'hiver après différents précédents .....	38
Figure 11: Différences d'effet précédent entre un lupin en culture pure et associé à un triticales .....	40
Figure 12 : Reliquats à la sortie de l'hiver du blé en fonction des reliquats au semis du blé (A) et de la quantité d'azote restituée au système dans les pailles du précédent (B) .....	40
Figure 13 : Rendement et composantes du rendement du blé en fonction de la biomasse d'adventice .....	42
Figure 14 : Biomasse d'adventice de la céréale en fonction de la biomasse d'adventice du lupin précédant .....	44
Figure 15 : Biomasse d'adventice du lupin (A) et de la céréale suivante (B) en fonction du mode d'insertion du lupin .....	44
Figure 16 : Biomasse d'adventice de la céréale en fonction du travail du sol.....	44
Figure 17 : IFT herbicide de la céréale en fonction de la biomasse d'adventice de la céréale (A et B) et du lupin (C) .....	46
Figure 18 : Impact des populations d'adventice du lupin sur celles du blé suivant .....	46
Tableau 1: Description des parcelles .....	28
Tableau 2: Synthèse des mesures réalisées au champ .....	30
Tableau 3 : Analyses statistiques.....	32
Tableau 4 : Variabilité des performances du blé dans le réseau en 2016 .....	36
Tableau 5 : Variabilité des indicateurs de l'effet précédent azote.....	36
Tableau 6 : Effet du type de lupin d'hiver ou de printemps et de l'année sur l'effet précédent du lupin .....	38
Tableau 7 : Corrélation entre la quantité d'azote accumulé par le blé non fertilisé et les variables mesurées.....	42
Tableau 8 : Mélanges de modèles expliquant la quantité d'azote du couvert de blé à maturité.....	42



## Remerciements

*Je souhaite adresser un grand merci à mon maître de stage Guénaëlle Hellou pour m'avoir proposé ce stage, pour avoir accepté de répondre à mes nombreuses questions, pour son aide et ses conseils ainsi que la relecture de ce travail, malgré son emploi du temps très chargé. Je la remercie également de m'avoir permis d'assister au séminaire du projet LEGITIMES en février à Paris.*

*Je tiens aussi à remercier Antoine Gardarin qui m'a suivi durant ce stage et avec qui j'ai eu l'occasion d'échanger autour de mon rapport et de ce stage.*

*Merci à Mathieu Lorin et Rim Baccar qui m'ont aidé dans la construction de la base de données et m'ont fourni de précieux conseils.*

*Je remercie aussi Julien Poret, Martine Mauline, Clarisse Blanchard, Timothée Cherièr, Vincent Oury, Antonin Leret et Alexandre Belouzard qui ont récolté et saisi les données durant les trois années du projet LEGITIMES.*

*Un grand merci à Claire Collot, Marie Devauchelle et Emil Simondon avec qui il fut très agréable de partager le bureau et d'échanger.*

*Je remercie aussi l'ensemble de l'équipe du LEVA, techniciens, assistantes, doctorants et enseignants-chercheurs pour leur accueil.*

*Je remercie également Brigitte Le Bihan et Laure Boussein pour leur aide précieuse.*

*Je souhaite aussi remercier les agriculteurs qui ont accepté de participer au projet.*

*Je remercie l'ANR qui a financé le programme LEGITIMES et Terrena, le partenaire de l'ESA sur ce réseau.*

*Je remercie la plateforme PLATIN' (PLATeau d'Isotopie de Normandie) pour la réalisation des analyses élémentaires et isotopiques utilisées dans cette étude, le laboratoire SAS pour les analyses de reliquats, ainsi que Safia Médiène pour nous avoir transmis les données de densité et de diversité floristique mesurée sur le lupin en 2016.*

*Enfin, puisque ce mémoire est présenté pour la validation de mon diplôme d'Ingénieur de l'ESA, je souhaite exprimer mon immense gratitude à mes parents Odile et Arnaud Boussein, ma famille, mes amis, ainsi que tous mes enseignants, de l'école Saint Aubin à l'ESA, en passant par le Collège Saint Martin, le Lycée de Pouillé, l'Université du Minnesota et AgroParisTech, ainsi qu'à mes orthophonistes et en particulier Philippe Luhisset. Ils m'ont chacun à leur manière fait avancer, malgré les difficultés, ce qui me permet aujourd'hui de présenter ce mémoire.*



## Summary

Lupine is a minor crop in France and Western Europe. However, lupine has interesting properties, such as its rich grain protein content, its little needs for fertilizers and its beneficial pre-crop effect. However, the variability of lupine's performances and the variation of its pre-crop effect are known to discourage farmers to produce this crop. The factors of variability of the lupine's effect on the subsequent crop have only been poorly studied in the past. The present study focuses on the identification and ranking of the different factors which have an impact on the lupine's pre-crop-effect (effects of the nitrogen provision service and weed control). A regional agronomic diagnosis has been established. Its field network is composed of 19 agricultural fields. Each field has been studied for a year of lupine or lupine-triticale intercrop and a year of winter wheat or winter barely. For the data analysis mixed-models and correlations analysis have been performed. These analysis show that the wheat nitrogen nutrition is more impacted by the nitrogen content of lupine residues than by the soil mineral nitrogen left by the lupine. Our results also show a strong correlation between the quantity of nitrogen in the residues and the lupine biomasses. These observations are suggesting that an adaptation of the wheat fertilization according to the lupine crop biomasses could help have an efficient valorization of the benefits of lupine pre-crop effect. Within our field network, the lupine often shows large weed biomass. However, the following wheat crop does not have important weed biomass. The lupine-triticale intercrop allows an important reduction of the quantity of weed in the lupine. Regardless of the previous crop's weed biomass, the current agricultural practices seem to allow a reasonable diminution of the weed populations. But in our study an important amount of pesticide has been sprayed by farmers compared with the quantity usually applied in this area. Our results need to be confirmed by the second year's experiment.

Key words: Pre-crop effect, Regional agronomic diagnosis, Lupine, Intercrop, Wheat

## Résumé

Le lupin est une légumineuse peu cultivée en France. Cette espèce présente pourtant de multiples atouts : production de grains riches en protéines, économies d'intrants et bénéfiques pour la culture suivante. La variabilité des performances du lupin et son effet précédent sont toutefois des freins majeurs à son développement. Les causes de variations des effets précédents de cette culture n'ont été que très peu investiguées. Cette étude cherche donc à déterminer et hiérarchiser les facteurs de variabilité des effets précédents du lupin sur le blé qui le suit (effet sur la fourniture d'azote et sur la maîtrise des adventices). Un diagnostic agronomique régional a été établi à partir d'un réseau de 19 parcelles agricoles. Chaque parcelle est suivie sur deux campagnes : une campagne de lupin ou d'association lupin-triticale, et une campagne de blé ou d'orge d'hiver. Pour analyser ces données, des mélanges de modèles et des analyses de corrélations sont utilisés. Il semble se dégager de ces analyses que l'effet précédent du lupin sur l'accumulation d'azote du couvert de blé suivant est davantage expliqué par la quantité d'azote restitué dans les pailles de lupin que par les reliquats d'azote minéral disponible après la légumineuse. La quantité d'azote des pailles de lupin est très corrélée à la biomasse du couvert de lupin. Il semble donc qu'une adaptation de la fertilisation en fonction de la biomasse du lupin soit une pratique favorable à la bonne valorisation agronomique de l'effet précédent azoté du lupin sur le blé. Le lupin présente parfois de fortes biomasses d'adventice. Malgré ces forts salissements, les adventices sont efficacement maîtrisées dans la céréale qui le suit. L'association lupin triticale apparaît comme un moyen efficace pour réguler les adventices dans le lupin. Il semble que la gestion des adventices telle qu'elle est menée par les agriculteurs aujourd'hui dans le blé soit efficace, mais qu'elle nécessite des quantités importantes d'herbicides. Ces résultats restent à confirmer avec les données de la campagne 2016-2017.

Mots clefs : Effet précédent, Diagnostic agronomique régional, Lupin, Association, Blé



## Table des abréviations

adv : adventices

ANOVA : analyse de la variance

Coef : coefficient de corrélation

CV : coefficient de variation de l'échantillon, le CV est l'écart type divisé par la moyenne

DAR : diagnostic agronomique régional

ESA : Ecole Supérieure d'Agricultures d'Angers

IFT : indice de fréquence de traitement, l'IFT est la somme de la dose des produits appliqués par hectare divisée par la dose homologuée et multipliée par la part de la surface traitée.

IFTh : indice de fréquence de traitement en herbicides

LEVA : unité de recherche : légumineuses, écophysiologie végétale, agroécologie de l'Ecole Supérieure d'Agricultures d'Angers

lup : lupin

0N : zones des parcelles de blé non fertilisées

N : zones des parcelles de blé fertilisées

Nb : nombre

Ncouv : azote du couvert de blé

NcouvL : azote du couvert de lupin à maturité

%Ndfa : pourcentage de l'azote aérien issu de la fixation symbiotique

NHI : indice de récolte azoté, le NHI est la part de l'azote des parties aériennes de la plante qui sont exportées dans les grains.

Nrest : quantité d'azote dans les pailles restituées après la culture de lupin

Nsem : reliquats au semis

OAD : Outil d'aide à la décision

p-value : probabilité critique

PMG : poids de mille grains

Qte Arg : quantité d'argile du sol

Qte MO : quantité de matières organiques du sol

Rdt : rendement

RSH : reliquats à la sortie de l'hiver

SAU : surface agricole utile

TP : teneur en protéines

t-test : test paramétrique de comparaison de moyenne

$w_i$  : poids d'Akaike





## Introduction

La révolution verte et l'intensification de l'agriculture ont conduit à la spécialisation des systèmes de culture. Ainsi, les légumineuses à graines ont quasiment disparu des assolements français et européens où elles représentent désormais moins de 2% de la surface agricole utile (SAU). Altieri (1999) suggère qu'une augmentation de la biodiversité cultivée dans l'espace et dans le temps favorise et diversifie les services écosystémiques rendus par les agroécosystèmes. Or, l'introduction de légumineuses est un levier majeur pour augmenter la diversité fonctionnelle des champs cultivés.

Parmi les légumineuses cultivées dans l'ouest de la France, le lupin semble pouvoir rendre une palette et une qualité de services écosystémiques intéressantes. Il permet souvent de fixer plus d'azote que les autres légumineuses ; il exporte aussi davantage d'azote que les autres légumineuses (autres que le soja) (Haynes *et al.*, 1993). Cette diminution des besoins en engrais permise par la fixation symbiotique réduit fortement les émissions de gaz à effet de serre liées à la production d'azote de synthèse par le procédé Haber-Bosch (IPCC, 2014) et aux épandages d'engrais chimiques et organiques (Schils *et al.*, 2008). De plus, ses graines riches en protéines (Jeuffroy *et al.*, 2015) peuvent dans certains cas se substituer au soja pour l'alimentation animale (Peyraud *et al.*, 2015; Froidmont et Bartiaux-Thill, 2004) ou remplacer un certain nombre d'ingrédients coûteux dans l'industrie agroalimentaire.

Outre ces services rendus à l'échelle de la campagne culturale, le lupin a aussi un effet favorable sur le rendement des céréales qui le suivent (Angus *et al.*, 2015; Jensen *et al.*, 2004; Seymour *et al.*, 2012). Cet effet aurait été relevé dès le premier siècle de notre ère, par Pline l'Ancien (D'après Vertes *et al.*, 2010). Pour lui, le lupin « tient lieu du meilleur engrais ».

Néanmoins, le lupin présente aussi des faiblesses comme sa faible compétitivité vis-à-vis des adventices (Albrecht, 2005; Lemerle *et al.*, 1995). De plus, de nombreux facteurs relatifs aux conditions pédoclimatiques et aux pratiques des agriculteurs entrent en compte dans la mise en place de l'effet précédent du lupin et des légumineuses, ce qui le rend très variable (Jeuffroy *et al.*, 2015; Preissel *et al.*, 2015; Seymour *et al.*, 2012).

Le manque de connaissances sur les causes de la variabilité des performances du lupin lui-même et de son effet précédent sont des freins techniques au développement de cette culture. Il est donc pertinent de chercher à expliquer la variabilité des effets précédents du lupin. Afin de préciser ce questionnement, nous présentons tout d'abord le contexte de l'étude et un état des lieux des connaissances succinctes sur le sujet.

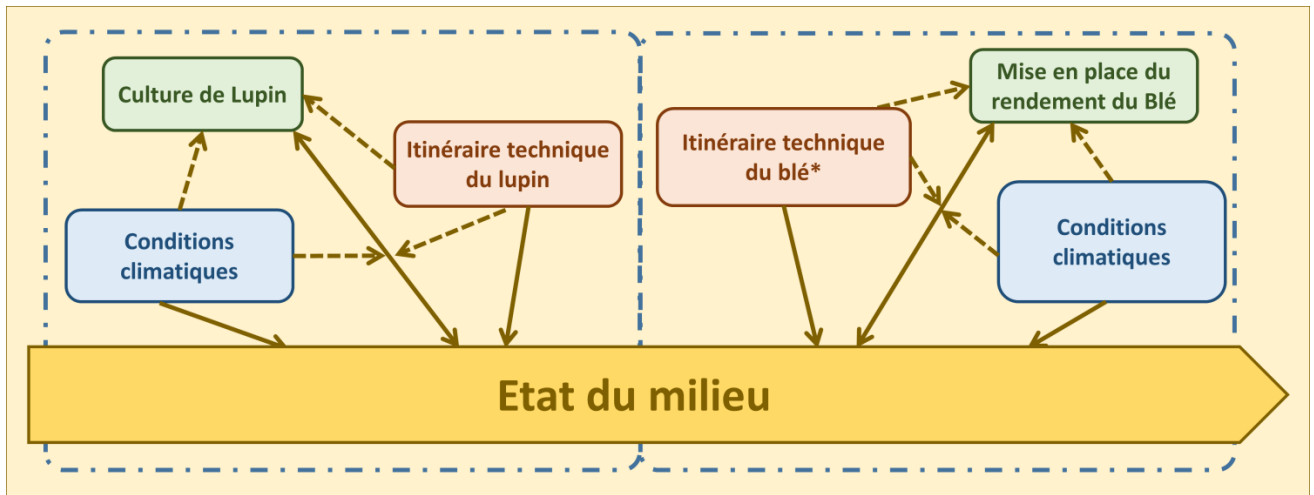
### 1. Cadre de l'étude

En Pays de la Loire, la coopérative Terrena a développé une filière permettant une bonne valorisation économique du lupin (comme ingrédient dans l'agroalimentaire). Mais, comme évoqué précédemment, la difficulté technique, le manque de connaissances sur cette culture et la forte variabilité des résultats découragent les agriculteurs.

Afin de permettre aux légumineuses à graines de prendre plus d'ampleur, il est nécessaire de développer les connaissances sur ces espèces. En effet, elles sont assez peu étudiées et notamment en conditions réelles de production (Meynard *et al.*, 2013; Jeuffroy *et al.*, 2013). Le projet ANR LEGITIMES cherche à pallier ce manque de connaissances en travaillant sur des filières de production de légumineuses développées par des coopératives.

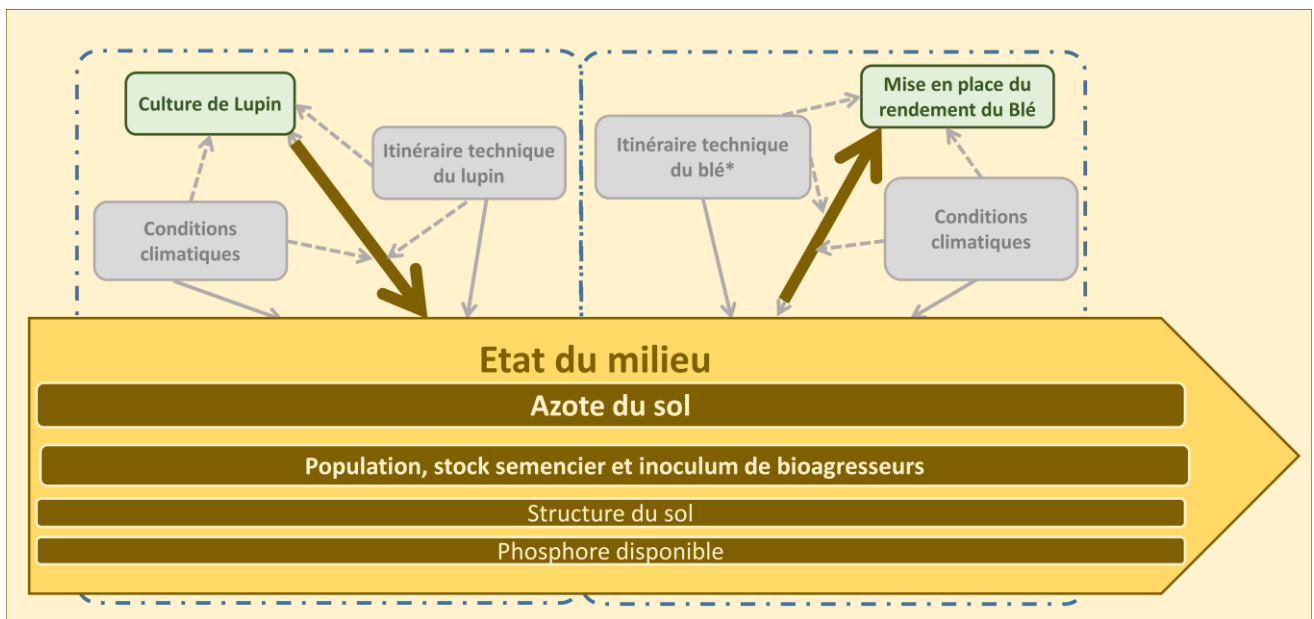
L'objectif de ce projet est de « construire et d'évaluer des scénarios territoriaux d'insertion de légumineuses dans les systèmes de culture pour répondre aux changements globaux » (Jeuffroy *et al.*, 2013). Ce projet se décline en trois axes : i) l'analyse des freins et leviers à l'insertion des légumineuses dans les filières, ii) la quantification des services rendus par les différentes légumineuses, iii) la mise en place de scénarios agronomiques et leurs évaluations.

La présente étude s'inscrit plus spécifiquement dans la seconde tâche et se concentre sur le lupin blanc et le blé qui le suit, dans les Pays de Châteaubriant et d'Ancenis (région Pays de la Loire). Dans cette zone, un observatoire de parcelles agricoles a été créé. L'unité de recherche Légumineuses, Ecophysiologie Végétale, Agroécologie (LEVA) de l'Ecole Supérieure d'Agricultures d'Angers (ESA) est responsable de son suivi.



**Figure 1: Relation entre itinéraire technique, climat, peuplement cultivé et milieu physique au cours de la succession lupin-blé (Adapté de Doré *et al.*, 1997)**

Cette figure est une représentation simplifiée. Les cadres en pointillés bleus sont les campagnes, les flèches représentent les interactions directes, les flèches en pointillés les interactions indirectes ou de faible intensité. \* : L'itinéraire technique du blé comprend la période d'interculture lupin-blé.



**Figure 2: Effets précédents du lupin sur le milieu et sensibilité du blé qui le suit à ces effets (Adapté de Doré *et al.*, 1997; Preissel *et al.*, 2015)**

Cette figure est une représentation simplifiée. Elle n'inclut notamment pas tous les états du milieu qui sont modifiés par le lupin, mais que les quatre principaux, cités par Preissel *et al.* (2015). Les cadres en pointillés bleus sont les campagnes, les flèches représentent les interactions directes, les flèches en pointillés les interactions indirectes ou de faible intensité. \* : L'itinéraire technique du blé comprend la période d'interculture lupin-blé.

## 2. Bibliographie

L'« effet précédent » est défini comme l'impact d'une culture, ici le lupin, sur le milieu laissé à la culture suivante. La « sensibilité du suivant » détermine, elle, comment le rendement et la qualité de la culture qui succède au lupin réagissent à l'état du milieu laissé par celui-ci (Doré *et al.*, 2006).

Nous faisons ici le point sur l'état des connaissances des effets précédents du lupin et de la sensibilité du blé à ces effets. Il s'agit donc, d'une part, de comprendre comment le lupin modifie le milieu en interaction avec les choix techniques des agriculteurs et les conditions climatiques pendant son cycle et, d'autre part, d'établir comment le blé réagit à ces états du milieu en interaction avec les pratiques des agriculteurs et le climat (Figure 1). Pour ce faire, nous décrirons dans un premier temps la mise en place des composantes du rendement chez le blé et les différents facteurs qui peuvent l'influencer. Puis, chacun des effets précédents du lupin seront présentés. Ces effets peuvent être divisés en quatre catégories : i) la fourniture d'azote, ii) la modification de la quantité de phosphore disponible, iii) l'impact sur les risques liés aux bioagresseurs du blé et iv) l'impact sur la structure du sol (Figure 2) (d'après Preissel *et al.*, 2015).

### 2.1. La mise en place du rendement et de la qualité chez le blé

#### 2.1.1. La mise en place du rendement chez le blé

En agronomie, le rendement est considéré comme la résultante d'un certain nombre de composantes. Une période critique est associée à chacune des composantes. Une fois passée cette période, la composante est fixée et elle n'est plus influencée par les facteurs abiotiques et biotiques du milieu (Figure 3).

Le nombre de pieds par m<sup>2</sup> se met en place entre le semis et la sortie de l'hiver. De manière générale, il est influencé par l'itinéraire technique et les conditions climatiques (Boiffin *et al.*, 1981; Deswarte, 2016). Les principaux facteurs de variation de cette composante sont les pratiques de semis : la densité de semis, la qualité du lit de semences (Boiffin *et al.*, 1981) et les dommages dus au gel, à l'excès d'eau et aux bioagresseurs (Deswarte, 2016). Les limaces peuvent, par exemple, avoir un impact important comme dans l'essai de Glen *et al.* (1989) où, dans certaines modalités, un tiers des plants de blé ont été éliminés par les limaces. La gestion des résidus du précédent semble aussi impacter significativement cette composante du rendement (Kumar et Goh, 2002).

Le nombre de grains par plante est la résultante des facteurs qui agissent sur le blé entre le début du tallage et la fin de la fécondation des grains. Cette composante est impactée par les carences en éléments minéraux notamment en azote (Boiffin *et al.*, 1981; David *et al.*, 2005) et par les bioagresseurs (David *et al.*, 2005; Deswarte, 2016). Elle est parfois subdivisée en nombre de talles fertiles par plante et nombre de grains par épis, mais ces variables intermédiaires n'ont pas été mesurées dans cette étude.

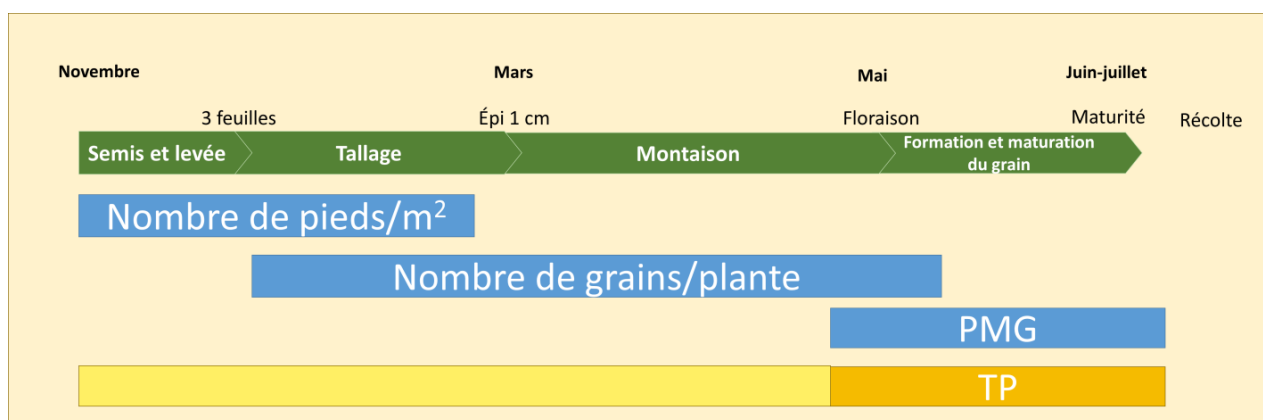
Enfin, le poids de mille grains s'établit à partir de la floraison et jusqu'à la fin du remplissage peu avant la récolte. Cette composante peut compenser en partie les composantes précédentes si elle n'est pas limitée par un stress biotique (parasitisme foliaire) ou abiotique, notamment azoté ou hydrique (Boiffin *et al.*, 1981; Deswarte, 2016).

Selon Brisson *et al.* (2010), le déclin des légumineuses dans les systèmes de culture est l'un des facteurs en cause dans la stagnation des rendements en blé en France. D'ailleurs, il est établi que l'effet précédent des légumineuses et du lupin est positif sur le rendement des céréales (Preissel *et al.*, 2015; Brisson *et al.*, 2010; Kirkegaard *et al.*, 2008; Cernay, 2016; Angus *et al.*, 2015; Seymour *et al.*, 2012) mais de nombreux facteurs rendent cet effet très variable (Jeuffroy *et al.*, 2015; Preissel *et al.*, 2015; Seymour *et al.*, 2012)(Partie 3.2).

#### 2.1.2. La mise en place du taux de protéines du grain de blé

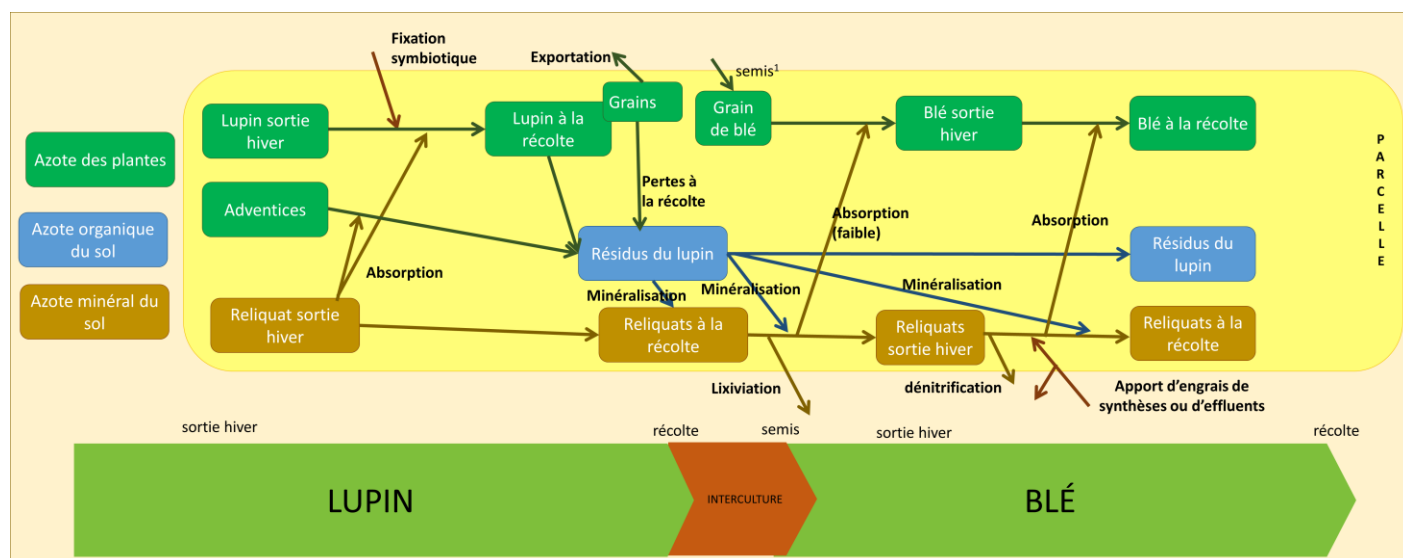
Le taux de protéines est un critère de qualité primordial pour le blé. En effet, les faibles teneurs en protéines des blés français sont leur principale faiblesse sur les marchés d'export (Arvalis, 2013). Le taux de protéines s'établit à la même période que le remplissage des grains, c'est-à-dire à partir de la floraison. Il est donc sensible aux facteurs limitants pendant cette période (Barbottin *et al.*, 2005).

Mais, une large part (environ 60 à 90%) de l'azote des graines est issue de la remobilisation de l'azote capté avant la floraison. Barbottin *et al.* (2005) ont montré que, quand les conditions sont non



**Figure 3 : Schéma simplifié de la mise en place des composantes du rendement chez le blé**

Ce schéma est une représentation simplifiée de la mise en place des composantes du rendement. Chacun des rectangles bleus représente la période critique à la mise en place d'une composante du rendement. Le rectangle orange est la période de la mise en place du taux de protéines, il est néanmoins influencé par toute la période recouverte par les rectangles jaune et orange. PMG : Poids de Mille Grains, TP : Teneur en protéines des grains de blé. Le rendement final (RdtF) peut s'écrire :  $RdtF = \text{Nombre de pieds/m}^2 \times \text{Nombre de grains/plante} \times \text{PMG} / 1000$ .



**Figure 4 : Illustration des flux de l'azote à l'échelle dans une parcelle durant une succession lupin-blé**

Cette figure est une représentation simplifiée. Elle n'inclut notamment pas la matière organique stable du sol et sa minéralisation qui peut jouer un rôle important. (1) Les semis sont matérialisés sur ce schéma comme une entrée d'azote bien que cet apport soit faible. Les flèches représentent les flux d'azote d'un compartiment à l'autre ou vers l'extérieur de la parcelle. La parcelle est matérialisée par le rectangle jaune.

limitantes pendant le remplissage des grains, la quantité d'azote remobilisée est directement liée à la quantité d'azote captée par le blé avant la floraison ( Figure 3). Tous les facteurs limitant fortement la nutrition azotée du blé en cours de cycle impactent donc aussi la teneur en protéines des grains.

De fait, le climat de l'année, le type de précédent et de rotation, le travail du sol et la fertilisation azotée sont les principaux facteurs qui modifient le taux de protéines des grains de blé (López-Bellido *et al.*, 1998; Jeuffroy *et al.*, 2015; Casagrande *et al.*, 2009).

La capacité à capter l'azote étant physiologiquement très liée à la photosynthèse (Lemaire et Millard, 1999), la compétition avec les adventices ou les dommages des maladies foliaires sur la photosynthèse peuvent donc avoir un impact négatif sur le taux de protéines. Néanmoins, ces effets sont en réalité variables selon les cas à la fois pour les adventices (Casagrande *et al.*, 2009; Mason et Madin, 1996) et les maladies fongiques (Dimmock et Gooding, 2002). Cette variabilité s'explique par i) la diminution des sources d'azote (comme la défoliation qui réduit la remobilisation ou la compétition pour la lumière qui limite l'absorption) qui réduit l'azote disponible, et ii) la diminution des puits (comme la diminution du nombre de grains) qui augmente l'azote disponible aux puits restants (Dimmock et Gooding, 2002; Ben Slimane, 2010). De manière générale, il a été montré que le taux de protéines est négativement corrélé avec le rendement (Debaeke *et al.*, 1996; Du Cheyon *et al.*, 2014). Il est donc cohérent que les facteurs ayant une action à la fois sur le rendement et la nutrition azotée de la plante aient des effets variables.

Le taux de protéines du blé est aussi lié à la gestion de la fertilisation azotée et au choix variétal, mais ces facteurs jouent un rôle plus modeste que le climat et l'état du milieu (Jeuffroy *et al.*, 2015).

Parmi les différents facteurs influençant les états du milieu qui conditionnent la mise en place des composantes du rendement et de la qualité, beaucoup sont modifiés par le précédent cultural. Dans un premier temps, voyons donc comment le lupin influence l'azote disponible pour le blé qui le suit.

## **2.2. L'effet précédent sur l'azote**

L'azote tient une place centrale pour l'obtention d'un rendement et d'un taux de protéines qui satisfassent les agriculteurs et les autres acteurs des filières. Le lupin, grâce à sa capacité à fixer l'azote atmosphérique, modifie profondément les flux d'azote dans la parcelle à l'échelle de la succession. La quantité d'azote fournie par les légumineuses disponible au blé suivant résulte : i) du choix de l'espèce de légumineuse, ii) de son itinéraire technique, iii) des conditions pédoclimatiques pendant la succession et iv) du choix du suivant et de sa gestion (Jeuffroy *et al.*, 2015). Les principaux flux d'azote à l'échelle de la succession lupin-blé sont synthétisés dans la Figure 4 et sont détaillés dans la suite.

### **2.2.1. Impact du Lupin sur l'azote laissé au système**

L'azote de l'air est souvent fixé en excédent par rapport aux exportations via les graines. Un calcul de bilan théorique est souvent utilisé comme premier indicateur pour l'analyse de l'effet précédent des légumineuses sur l'azote (Voisin et Gastal, 2015).

Le service de fourniture d'azote pour le suivant se fait suivant deux voies : l'azote minéral du sol à la récolte (reliquats) et l'azote restitué via les résidus de la culture à la fois aériens et souterrains qui contribueront à accroître le stock d'azote minéral du sol disponible au fur et à mesure de sa minéralisation (Jeuffroy *et al.*, 2015; Voisin et Gastal, 2015; Kaul, 2004).

#### **2.2.1.1. Les reliquats**

Les reliquats après une légumineuse sont plus importants que ceux des autres cultures habituellement produites (Voisin et Gastal, 2015; Kaul, 2004). Cela s'explique par une plus faible absorption de l'azote minéral du sol pendant la culture de la légumineuse et par l'éventuel début de minéralisation des résidus laissés au sol.

Différents facteurs font varier les reliquats à la récolte. Kaul (2004) observe que le lupin laisse des reliquats plus faibles que les autres légumineuses lorsque la culture produit de faibles rendements. Ses résultats montrent aussi des variations importantes entre deux années, sans lien avec les rendements.

La gestion de la légumineuse en culture pure ou en association est un facteur majeur de variations des reliquats post-récoltes des légumineuses. Il semble qu'en moyenne, les reliquats après une

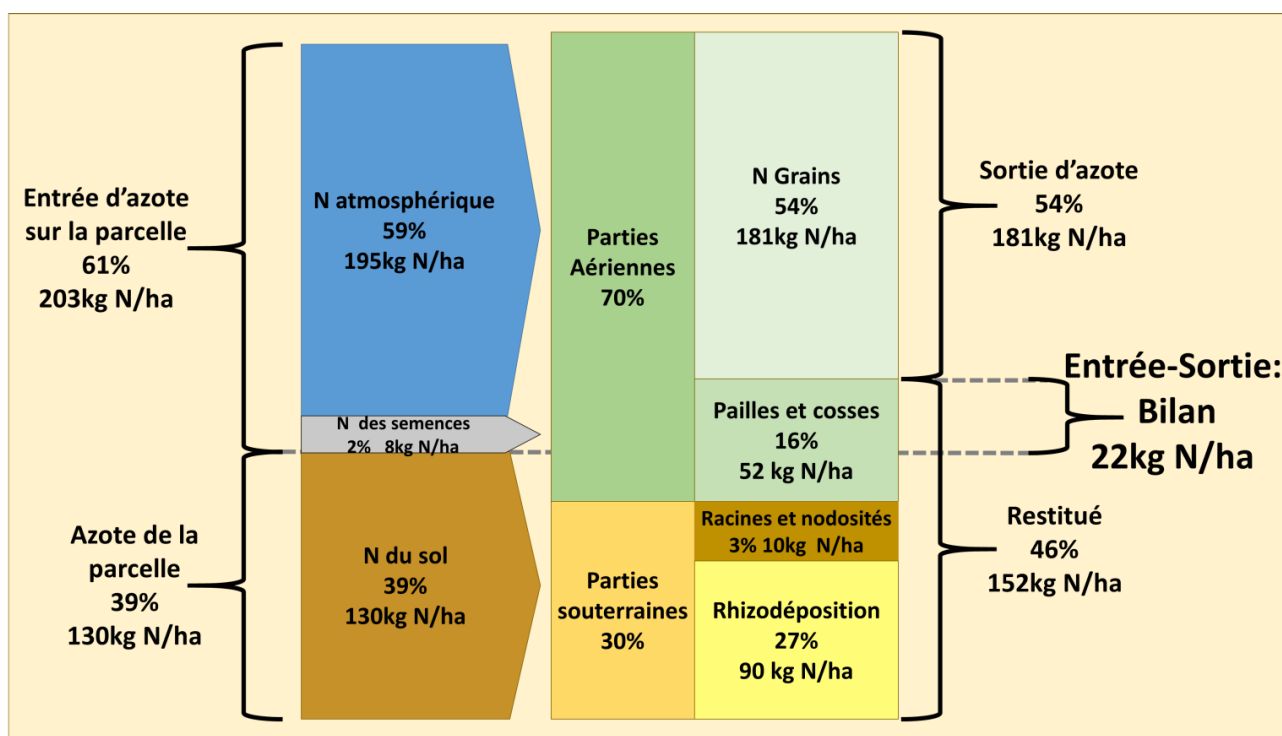


Figure 5 : Exemple de solde azoté d'une culture de pois d'après Voisin et Gastal (2015) (d'après UNIP, ESA, INRA, Arvalis et Mathieu *et al.*, 2007)

Ces valeurs sont des ordres de grandeur pour un pois ayant un rendement de 55q/ha et 24% de teneur en protéines des grains.  
N : azote

association pois-blé soient inférieurs aux reliquats du pois pur et égaux à ceux du blé pur (Vertès *et al.*, 2010). La même observation a été faite sur la quantité d'azote assimilée par une culture de pois associée à une orge par Corre-Hellou *et al.* (2011).

L'augmentation des reliquats est liée à la réduction de l'absorption de l'azote du sol observée sur les légumineuses qui est possible grâce à la fixation symbiotique. Tout ce qui influe sur la capacité de la plante à fixer l'azote de l'air aura donc potentiellement des conséquences sur les reliquats à l'issue de la culture de légumineuse. De nombreux mécanismes influent sur la fixation. Ainsi, la concentration en azote minéral du sol pénalise la fixation chez le pois (Voisin *et al.*, 2002). De même, sur les associations d'espèces, les apports d'azote pénalisent temporairement la fixation (Vertès *et al.*, 1997; Naudin *et al.*, 2010; Voisin et Gastal, 2015). La concentration en différents éléments chimiques du sol, le pH, la température et la quantité d'eau dans le sol ont aussi un impact sur la fixation (Voisin et Gastal, 2015). Ces effets sont réversibles s'ils sont de courte durée (Voisin et Gastal, 2015).

Les itinéraires techniques peuvent contribuer à la réussite de la fixation symbiotique. Outre la fertilisation, le travail du sol et le drainage ont un impact sur l'aération et l'humidité du sol qui jouent sur la fixation ; de même l'inoculation modifie la capacité de fixation (Voisin et Gastal, 2015). La gestion de certains bioagresseurs et notamment des ravageurs comme les sitones sur le pois, réduisent fortement le fonctionnement des nodosités, faisant baisser la part de l'azote fixé (de 72 à 49%) (Corre-Hellou et Crozat, 2005). La présence d'adventices semble stimuler la fixation (Corre-Hellou et Crozat, 2005). Néanmoins, le rendement peut être affecté, ce qui peut réduire indirectement la fixation totale. Les cultures associées ont aussi un effet positif sur la fixation. En effet, les céréales ont des croissances racinaires plus rapides que la légumineuse (Corre-Hellou *et al.*, 2006). La concentration en azote minéral est donc plus faible dans les horizons explorés par le pois car il arrive après que la céréale ait commencé à capter l'azote du sol. Si la compétition est trop forte, la légumineuse perd une partie de sa capacité à fixer l'azote (Bedoussac et Justes, 2010).

#### 2.2.1.2. *La quantité d'azote restituée au système dans les résidus*

D'importantes quantités d'azote sont restituées à la parcelle sous forme de résidus de culture par la légumineuse. Ces résidus sont de trois ordres : i) des pailles et des chaumes, ii) des racines et des rhizodépôts et iii) des grains perdus à la récolte (Figure 5).

Les pailles représentent environ 15% de l'azote total de la plante dans le cas du pois (Voisin et Gastal, 2015), mais la quantité d'azote contenue dans les pailles d'une parcelle est très variable. Les résultats de Corre-Hellou et Crozat (2005) montrent une variation de 8 à 116 kg/ha d'azote dans les pailles de pois, sur un réseau de parcelle en agriculture biologique, principalement en raison de variations de la biomasse.

Il peut arriver que les pailles de certaines légumineuses pures ou en mélanges soient exportées, ce qui réduit de fait les restitutions d'azote. Dans ce cas, les bénéfices de la culture de légumineuses sur le blé suivant et à long terme peuvent être réduits (Bakht *et al.*, 2009).

Les résidus souterrains représentent une part substantielle des restitutions d'azote au champ (Kumar et Goh, 2002). Les racines et les rhizodépôts sont généralement considérés comme représentant environ 30% de l'azote total de la plante (pour le pois), soit 2/3 des résidus (Voisin et Gastal, 2015). Cette valeur pourrait être plus élevée pour le lupin qui semble rhizodéposer plus que le pois (Voisin et Gastal, 2015; Mayer *et al.*, 2003).

Les pertes de grains à la récolte sont parfois élevées et sont à l'origine d'une baisse des exportations d'azote des parcelles. Cette baisse peut être importante au vu du fort pourcentage de pertes parfois observé : de 15 à 75% (Cheriere, 2016). La question du devenir de ces graines et de leur minéralisation reste mal connue.

Il semble que l'association lupin-triticales permette de diminuer ces pertes avec l'augmentation de la hauteur des premières gousses induite par la compétition pour la lumière entre les deux espèces (par exemple Association pour une AEI, 2014). Elle modifie aussi la composition et la quantité de résidus apportées aux systèmes.

#### 2.2.1.3. *La vitesse de minéralisation des résidus*

Une fois les résidus restitués à l'agroécosystème, l'azote des résidus doit être minéralisé pour être utilisable par les plantes non fixatrices comme le blé. Il semble que, seule une faible part (moins de 30%) de l'azote des résidus est absorbée par la première culture suivant une légumineuse





(Jensen, 1994; Peoples *et al.*, 2009). La vitesse de minéralisation des résidus explique probablement pourquoi l'effet des légumineuses à graines sur l'azote peut se faire ressentir deux à trois ans (Kirkegaard et Ryan, 2014; Kumar et Goh, 2002).

La texture, la température et l'humidité du sol ont un impact sur la vitesse de minéralisation. Ainsi, en Finlande, une étude a montré que l'effet précédent peut être reporté à la deuxième culture suivant la légumineuse, si les conditions météo sont trop froides (Keskitalo *et al.*, 2012).

La minéralisation des résidus est principalement impactée par des facteurs abiotiques. Ainsi, le labour augmente la minéralisation des résidus de cultures (Kumar et Goh, 2002; Thevenet *et al.*, 2002), ce qui accroît l'effet précédent des légumineuses (pois et trèfles) sur le rendement et la quantité d'azote capté par le blé suivant la légumineuse (Kumar et Goh, 2002).

Au regard de ces éléments on voit que de nombreux facteurs jouent potentiellement sur les deux voies de l'effet précédent azote : les reliquats laissés après le lupin et l'apport d'azote permis par la minéralisation des résidus de culture. Néanmoins, les éléments disponibles dans la bibliographie restent parcellaires et mal hiérarchisés. Outre la variabilité de ces effets précédents, les pratiques mises en œuvre pendant l'interculture et le suivant ont aussi un impact sur la valorisation de l'azote laissé par le lupin.

## **2.2.2. Facteurs de variabilité de la sensibilité du blé à l'effet précédent azote du lupin**

### *2.2.2.1. Les pertes par lixiviation pendant l'hiver*

Les pertes d'azote par lixiviation des nitrates en hiver peuvent notamment réduire la quantité d'azote du sol disponible pour le blé. Les précipitations sont le principal facteur qui influence ce phénomène puisque c'est l'eau qui, en percolant, entraîne les nitrates dans les nappes. La texture et la structure du sol jouent aussi un rôle en raison de leurs influences sur le parcours et la vitesse de déplacement de l'eau dans le sol. Le risque de lixiviation est connu pour être accru après une légumineuse puisque les reliquats à l'entrée de l'hiver sont plus importants (Vertes *et al.*, 2010; Kaul, 2004).

Les différentes pratiques qui jouent sur le drainage du sol auront un effet indirect sur les pertes par lixiviation. La mise en place de couvert est le principal levier pour réduire la lixiviation des ions nitrates (Jeuffroy *et al.*, 2015; Vertes *et al.*, 2010). Mais, la période d'interculture courte entre le lupin et le blé et les conditions de germinations souvent défavorables (sèches) après la récolte du lupin rendent difficile la réussite d'un couvert.

Il semble que les associations soient un bon moyen pour réduire les reliquats à la récolte et donc les risques de lixiviation (voir point 2.2.1.1).

### *2.2.2.2. La fertilisation du blé*

Les résultats disponibles dans la littérature laissent penser que plus la fertilisation du suivant est forte, moins il est sensible au précédent légumineuse et lupin (Kirkegaard *et al.*, 2008; Preissel *et al.*, 2015; Seymour *et al.*, 2012). Avoir des résultats plus précis, plus spécifiques au contexte de production de l'ouest de la France permettrait un meilleur ajustement des pratiques.

### *2.2.2.3. Effet des bioagresseurs sur la valorisation de l'effet précédent Azote par le blé*

La gestion des bioagresseurs a un impact important sur la nutrition azotée de la plante et son rendement (voir 2.1.2) et donc potentiellement sur sa sensibilité à l'effet précédent azote du lupin.

L'effet des légumineuses à graines ne se limite pas à l'azote. McDonald (1989) suggère même que, dans certains contextes, le bénéfice de l'effet précédent du lupin est davantage attribuable à la coupure du cycle des bioagresseurs qu'à un effet de l'azote.

## **2.3. L'effet précédent du lupin et les bioagresseurs**

### **2.3.1. Les Adventices**

Certaines légumineuses fourragères et notamment la luzerne sont souvent citées pour leurs impacts défavorables aux adventices dans les rotations (par exemple David *et al.*, 2005). Cet effet est plus mitigé et variable pour le lupin et les légumineuses à graines qui ont souvent une faible compétitivité



vis à vis des adventices (Jeuffroy *et al.*, 2015; Voisin et Gastal, 2015; Corre-Hellou *et al.*, 2011; Albrecht, 2005). Cette faible compétitivité s'explique par l'énergie nécessaire à la mise en place des nodosités en début de cycle qui ralentit l'implantation du couvert, la forte quantité d'azote du sol laissée aux adventices par les légumineuses et leur nutrition azotée qui repose principalement sur l'azote des grains en début de cycle (Dayoub *et al.*, 2017), et la faible vitesse d'enracinement des légumineuses (Corre-Hellou *et al.*, 2007). La difficulté à gérer les adventices est accentuée sur le lupin pour lequel peu de références techniques sont disponibles et un faible nombre de substances actives sont homologuées (Cheriere, 2016; Meynard *et al.*, 2013). Ces pullulations peuvent augmenter le stock semencier du sol et être problématique sur les cultures suivantes (par exemple : Seymour *et al.*, 2012 sur le lupin à feuilles étroites d'après Rowland *et al.*, 1988; Albrecht, 2005).

La germination et le développement des adventices est très liée aux conditions climatiques de température et d'humidité (par exemple Forcella *et al.*, 2000). Elles ont donc probablement un impact important sur le salissement du lupin et la sensibilité du blé aux éventuels effets du lupin sur le stock semencier. La gestion des adventices, grâce au labour, au décalage des dates de semis, au désherbage mécanique et chimique permet de réduire la biomasse d'adventice dans le lupin et ainsi réduire son impact potentiel sur le stock semencier de la parcelle. L'association de culture semble un levier majeur pour réduire la biomasse d'adventice sans faire usage d'herbicides (par exemple Corre-Hellou *et al.*, 2011 sur l'association pois-orge).

Globalement, diversifier la rotation y compris avec des légumineuses peut tout de même avoir un effet positif (par exemple Liebman et Dyck, 1993). En effet, la rotation permet souvent de couper le cycle des adventices et de limiter la résistance aux herbicides en variant les matières actives.

### **2.3.2. Les autres bioagresseurs**

L'insertion du lupin dans une rotation permet de couper pendant une saison le cycle de nombreux autres bioagresseurs (réduction de l'inoculum primaire l'année suivante). Cet effet est principalement observé pour les nématodes et les maladies fongiques ayant de faibles capacités de dispersions. C'est particulièrement le cas du piétin échaudage (Kirkegaard *et al.*, 2008; Kirkegaard et Ryan, 2014). D'autres mécanismes que le seul effet non hôte entrent probablement en jeu car Cotterill et Sivasithamparam (1988b) ont montré que l'inoculum de piétin échaudage est plus réduit après une année de culture de lupin qu'après un pois. D'autres maladies sont réduites par une coupure de cycle. Ainsi, Dill-Macky et Jones (2000) ont montré que l'incidence et la sévérité de la fusariose de l'épi du blé est réduite si le blé est précédé par un soja comparé à des précédents blés ou maïs. Ils notent aussi que cet effet entre en interaction avec les conditions d'humidité (irrigation) et avec le travail du sol. Un faible travail du sol semble favoriser la maladie. Ces exemples ne sont pas exhaustifs mais ils montrent l'importance d'analyser les bénéfices d'une coupure de cycle sur certaines maladies en relation avec les pratiques et les conditions pédoclimatiques des parcelles étudiées.

Cotterill et Sivasithamparam (1988a) notent que, dès lors que la proportion d'adventice graminées dépasse un seuil de 20%, l'inoculum de piétin échaudage n'est plus réduit. Dans le cas du lupin en association avec du triticales, une part des plantes cultivées sont hôtes de pathogènes du blé comme le piétin échaudage. Peu d'éléments semblent disponibles sur l'effet précédent des associations sur les bioagresseurs et notamment les maladies fongiques. De plus, des antagonismes pourraient permettre de réduire l'infection sans avoir réduit l'inoculum (Cotterill et Sivasithamparam, 1988a).

Bien que les points suivants ne fassent pas l'objet d'une étude approfondie dans cette étude, il semble important de garder à l'esprit que d'autres facteurs entrent en compte dans l'effet précédent du lupin sur le blé.

### **2.4. Les autres effets du lupin sur la culture suivante**

Le lupin forme des racines protéoïdes et dégage des phosphatases qui lui permettent de capter le phosphore indisponible pour les autres plantes en conditions déficientes (Gilbert *et al.*, 1999). En association, la plante compagne bénéficie de l'action du lupin sur le phosphore du sol (Cu *et al.*, 2005; Lelei et Onwonga, 2014). Il semblerait que la culture suivant le lupin puisse aussi, dans certains cas, bénéficier du phosphore libéré mais ces observations ont été réalisées en milieux contrôlés (Kirkegaard *et al.*, 2008).

Il semblerait également que le lupin améliore la porosité des sols pour la culture suivante (Preissel *et al.*, 2015; Kirkegaard *et al.*, 2008). Il a été observé que la sensibilité du suivant à cet effet est très



dépendante du travail du sol (Preissel *et al.*, 2015) qui réduit l'écart entre parcelles avec des précédents lupins ou autres.

Ces deux effets ne sont pas directement étudiés dans cette étude mais il est bon de les garder à l'esprit dans les analyses.

### 3. Problématique

Une forte variabilité des effets précédents du lupin sur les céréales à paille est observée sur le terrain. La faiblesse des connaissances des facteurs en cause dans cette variabilité et de leur importance relative rend difficile la valorisation de ces effets dans les systèmes de culture. Elle est pourtant nécessaire à l'insertion du lupin dans les assolements dont l'effet précédent est l'un des principaux atouts.

De plus, peu de données scientifiques et techniques sont disponibles sur le lupin et les références existantes viennent de contextes de production très différents de celui des Pays de la Loire. Beaucoup de publications portant sur le lupin proviennent de l'ouest de l'Australie où les rendements, les pratiques culturales et le contexte pédoclimatique sont très différents de celui des Pays de Loire.

Dans ce contexte, ce travail se focalise sur les questions suivantes : quels sont les principaux facteurs de variabilité des effets précédents du lupin sur les céréales à paille à prendre en compte dans le contexte de l'ouest de la France, et comment mieux valoriser ces effets ?

Pour réaliser ce diagnostic, la présente étude se concentre principalement sur la dynamique de l'azote et des adventices qui semblent être les principaux facteurs en cause dans les effets précédents. Ainsi, nous testons les hypothèses suivantes :

- a) L'effet précédent du lupin est en grande partie attribué à son effet azote. Nous essayons ici de déterminer si les variations de la nutrition azotée du blé sont bien expliquées par la quantité d'azote laissée par le lupin dans le sol et ses résidus, et si la valorisation de cet azote est d'autant meilleure que la quantité d'azote apportée par la fertilisation est faible.
- b) Les cultures associées sont connues pour absorber plus d'azote minéral du sol et mieux couvrir le sol que les cultures pures. Nous chercherons donc à vérifier que le bénéfice de la culture associée lupin-triticales est plus faible en termes de fourniture d'azote, mais est plus favorable au contrôle des adventices dans la céréale suivante.
- c) Le lupin est considéré comme très sensible à l'enherbement. Nous tâcherons de voir dans quelle mesure de fortes biomasses d'adventice dans le lupin ont un impact sur le salissement de la céréale suivante.

Outre la validation de ces hypothèses, nous chercherons à voir quelles pratiques permettent de modifier favorablement les effets précédents du lupin et la sensibilité du blé à ces effets, à la fois grâce aux conclusions des mesures réalisées dans cette étude et aux échanges avec les agriculteurs.

### 4. Matériel et méthodes

Cette étude s'inscrit dans une démarche de Diagnostic Agronomique Régionale (DAR) telle que décrite par Doré *et al.* (1997; Doré *et al.*, 2008). Le DAR consiste à tirer parti de la variabilité du contexte pédoclimatique et des itinéraires techniques des parcelles en conditions réelles de production pour déterminer et hiérarchiser les facteurs limitant la mise en place des composantes du rendement et leur importance respective. Il a déjà été utilisé pour diagnostiquer les rendements du blé en production biologique et conventionnelle (par exemple David *et al.*, 2005; Leterme *et al.*, 1994) et le taux de protéines du blé (par exemple Casagrande *et al.*, 2009). Ici, ce cadre est adapté pour étudier spécifiquement les effets précédents du lupin sur les céréales à paille.

#### 4.1. Le dispositif expérimental

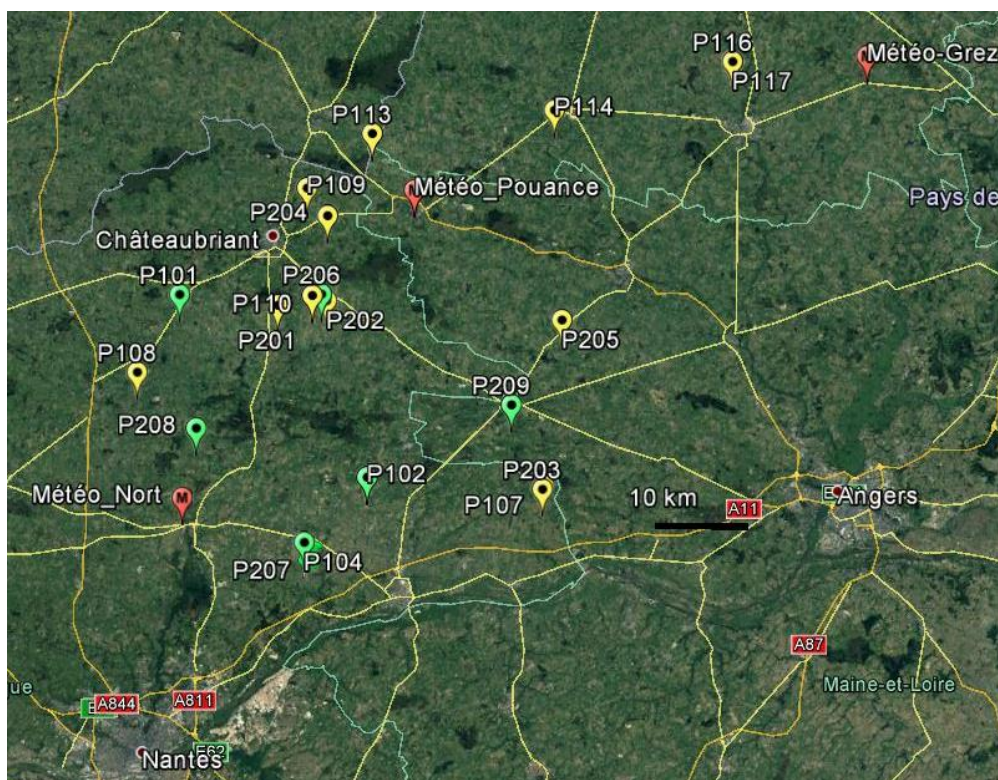
##### 4.1.1. Les parcelles

Le réseau de parcelles étudié ici se trouve dans le bassin de collecte de lupin de la coopérative Terrena autour de Châteaubriant (Figure 6). Dix-neuf parcelles composent ce réseau. Chaque parcelle est suivie sur deux campagnes : d'abord une campagne de lupin, puis une culture de céréale l'année suivante. Parmi les cultures de lupin (d'hiver ou de printemps), six ont été conduites en association avec du triticales. Les céréales suivant les lupins sont toutes des blés tendres d'hiver à l'exception de

**Tableau 1: Description des parcelles**

N°	Lupin pur/asso	Année du lupin (n)	Culture suivante	Année du suivant (n+1)	Précédent (n-1)	Station météo	Texture du sol	Profondeur du sol (cm)	pH
P101	Association	14-15	Ogre	15-16	Blé	Nort	Limon sableux	82	7,2
P102	Association	14-15	Blé	15-16	Blé	Nort	Sable argilo limoneux	80	7,4
P104	Association	14-15	Blé	15-16	Blé	Nort	Limon argilo sableux	76	6,9
P106	Pur hiver	14-15	Blé	15-16	Blé	Pouance	Limon argilo sableux	90	7
P107	Pur hiver	14-15	Blé	15-16	Colza	Pouance	Sable limoneux	83	7,2
P108	Pur hiver	14-15	Blé	15-16	Orge	Nort	Limon sablo argileux	83	7,1
P109	Pur hiver	14-15	Blé	15-16	Orge	Pouance	Limon sablo argileux	83	6,7
P110	Pur hiver	14-15	Blé	15-16	Blé	Pouance	Limon sablo argileux	82	7,3
P111	Pur printemps	14-15	Blé	15-16	Blé	Nort	Sable argilo limoneux	76	6,5
P113	Pur printemps	14-15	Blé	15-16	Blé	Pouance	Limon sablo argileux	NA	6,7
P114	Pur printemps	14-15	Blé	15-16	Orge	Pouance	Limon sablo argileux	75	6,3
P116	Pur printemps	14-15	Blé	15-16	Blé	Greze	Limon sablo argileux	66	6,9
P117	Pur printemps	14-15	Blé	15-16	Colza	Greze	Limon sablo argileux	66	7
P201	Pur hiver	15-16	Blé	16-17	Blé	Pouance	Limon sablo argileux	74	6,8
P202	Pur hiver	15-16	Blé	16-17	Blé	Pouance	Limon argilo sableux	75	7,2
P203	Pur hiver	15-16	Blé	16-17	Colza	Pouance	Limon sablo argileux	87	7
P204	Pur hiver	15-16	Blé	16-17	Orge	Pouance	Limon sablo argileux	87	6,5
P205	Pur hiver	15-16	Blé	16-17	Blé	Pouance	Limon sablo argileux	90	6,8
P206	Association	15-16	Blé	16-17	Orge	Pouance	Limon sablo argileux	56	7,1
P208	Association	15-16	Orge	16-17	Blé	Nort	Limon sablo argileux	60	7,1
P209	Association	15-16	Blé	16-17	Blé	Pouance	Sables argilo limoneux	58	6,2

N° : numéro attribué à chaque parcelle, Asso : culture associée lupin-triticales, Pur : lupin pur. Certaines parcelles ont été suivies durant une campagne de lupin mais ont été abandonnées car leur suivant n'était pas une céréale à paille, ces parcelles ne sont pas représentées ici. Il s'agit au total de deux parcelles en association et deux en lupin de printemps sur le premier couple d'années (2014-2016) et une parcelle d'association sur le second.



**Figure 6 : Carte de la répartition des parcelles et des stations météo utilisées (Source : Google Earth le 01.03.2017)**

deux parcelles d'orge d'hiver. (Tableau 1 et Figure 6). On notera que seule une partie des parcelles sont pas analysées ici car les mesures à la récolte des céréales n'ont pas encore été réalisées sur la campagne 2016-2017. Pour l'analyse de l'effet précédent azote (*stricto sensu*) du lupin, l'ensemble des parcelles des deux couples d'années est étudié et ce, quel que soit le suivant.

Les sols du réseau sont généralement des Limon-sablo-argileux en surface avec de l'argile ou du schiste sur les horizons plus profonds. La profondeur des sols avoisine les 80cm en moyenne. Il existe toutefois des variations importantes de type de sol entre les parcelles et parfois même au sein d'une même parcelle (Tableau 1).

Le climat de la région est océanique tempéré. La campagne 2015-2016 a été particulièrement défavorable à la production de blé en raison : du gel tardif et des précipitations extraordinairement élevées pendant la floraison et le remplissage des grains (Annexe 1).

Sur chacune des parcelles du réseau, des mesures sont menées sur le lupin et la céréale qui le suit. Les résultats du lupin ont déjà été analysés dans le mémoire de Timothée Cherié (2016). Les mesures réalisées sur le lupin seront utilisées pour être mises en relation avec les états du milieu à l'implantation de la céréale et leurs effets sur son rendement. Certaines mesures ont été effectuées mais ne sont pas utilisées dans ce rapport ; elles ne sont donc pas détaillées ici (Annexe 3).

#### **4.1.2. Mesures réalisées sur le précédent**

Dans chaque parcelle de lupin, trois zones de vingt mètres par trente sont définies à une distance supérieure à dix mètres de la bordure du champ. Ces trois zones sont enregistrées grâce à un GPS. La moitié de la zone est utilisée pour les notations et les prélèvements de la première année (année n) sur le lupin et la deuxième moitié sert aux prélèvements et aux notations pendant la campagne de la céréale (année n+1).

Dans le cas des associations une bande en pure est réalisée et trois autres zones sont mises en place dans cette bande.

Dans chacune des trois zones des parcelles en lupin pur (ou chacune des six zones des parcelles en association) six placettes de notations et de prélèvements sont réalisées à la levée. Chaque placette fait trois rangs de large sur un mètre de long. La surface exacte de chaque placette est notée. (Annexe 2).

##### **4.1.2.1. Mesures du rendement du lupin et de ses composantes**

Dans ces placettes, le nombre de plants de lupin levé par m<sup>2</sup> est mesuré à la levée. Dans le cas des associations, la densité de triticales est aussi mesurée.

La biomasse aérienne de la culture est mesurée à la floraison du lupin grâce au prélèvement de trois placettes. Cette mesure est réalisée par pesée de la biomasse aérienne après 48h dans une étuve à 70°C. Les biomasses de lupin, de triticales (dans le cas des associations) et d'adventice sont mesurées séparément.

La même opération est réalisée sur les trois autres placettes à maturité après la fin de remplissage des grains. Lors de cette deuxième mesure, la biomasse de grains est mesurée séparément ce qui permet de calculer le rendement. Le poids de mille grains (PMG) est aussi mesuré.

Les teneurs en azote des grains, des pailles et des adventices sont mesurées sur les échantillons aux deux dates de prélèvements de la biomasse. Ces mesures sont réalisées à partir d'un échantillon composé d'une des placettes de chacune des trois zones de chaque modalité (Tableau 2). Pour réaliser ces analyses, les échantillons sont broyés, homogénéisés et conditionnés en microcapsules avant d'être envoyées pour des analyses par spectroscopie de masse.

##### **4.1.2.2. Mesures de la fixation symbiotique**

La fixation symbiotique est mesurée grâce à la méthode de l'abondance naturelle en N15 développée par Amarger *et al.* (1979). Elle consiste à mesurer la différence de prévalence isotopique de l'azote 15 entre le lupin et une plante non fixatrice (ici des adventices) de la même placette. Cela permet d'évaluer le %Ndfa du lupin c'est-à-dire la part de l'azote des parties aériennes de la plante qui provient de l'atmosphère.

##### **4.1.2.3. Autres mesures**

Dans les parcelles de lupin associées, des mesures de diversité et d'abondance de la flore adventice ont été réalisées à la floraison du lupin (ces mesures n'ont été réalisées que sur le second couple

**Tableau 2: Synthèse des mesures réalisées au champ**

Mesures	Stade	Lupin (année n)			Céréale (année n+1)			
		Association*		Pur	Précédent lupin en association*		Précédent lupin pur	
		Lupin	Triticale		0N	N	0N	N
<b>Composantes du rendement et biomasse</b>								
Nombre de pieds par m <sup>2</sup>	Levée	X	X	X	X	X	X	X
PMG	Maturité	X	X	X	X	X	X	X
Rendement	Maturité	X	X	X	X	X	X	X
Biomasse de paille	Maturité	X	X	X	X	X	X	X
<b>Mesures de l'azote dans le couvert</b>								
%N et des grains	Maturité	X	X	X	X	X	X	X
%N et des pailles	Maturité	X	X	X	X	X	X	X
%N et des adventices	Maturité		X	X	0	0	0	0
%Ndfa	Maturité	X	0	X	0	0	0	0
<b>Mesures de l'azote dans le sol</b>								
Reliquats	Semis		X	X	0	X	0	X
	Sortie hiver		X	X	0	X	0	X
	Récolte		X	X	0	0	0	0
<b>Mesures relatives aux adventices</b>								
Biomasse d'adventice	Floraison		X	X	0	0	0	0
	Récolte		X	X	X	X	X	X
Densité par espèce	Floraison		X	X	X	X	X	X
<b>Mesures maladies et ravageurs</b>								
Mesures en cas de pression	Tout stade	X	X	X	X	X	X	X

Les croix représentent les mesures réalisées et les zéros les mesures non effectuées dans cet essai. \*ces mesures ne sont réalisées que sur les six parcelles qui ont un lupin associés en année n. 0N : zone sans fertilisation, N : zone fertilisée, PMG : poids de mille grains, Ndfa : part de l'azote atmosphérique de la plante. Ce tableau n'inclut pas les mesures de diversité et de densité d'adventice. Pour plus de détails voir annexe 3.



d'années). Elles ont été menées dans les placettes de la bande en pure et de la zone en association. Ces mesures consistent à évaluer la densité de chaque espèce d'adventice dans chaque placette.

En cas de symptômes, de dommages ou de dégâts de maladies ou de ravageurs, des notations visuelles sont réalisées. Ces notations peuvent concerner aussi bien le lupin que le triticale pour les parcelles en association. Voir l'annexe 3.

#### **4.1.3. Mesures effectuées sur la céréale suivant le lupin**

Les mesures sont réalisées sur les céréales sur les trois (ou six) mêmes zones que pendant le précédent. Une bande non fertilisée est mise en place avec deux nouvelles zones de prélèvement et de notation.

Les mesures sont sensiblement les mêmes que sur le lupin à l'exception des mesures de biomasses qui ne sont réalisées qu'une seule fois, à maturité.

D'autre part, des mesures de reliquats azotés sont effectuées à la récolte du lupin, au semis du blé et en sortie d'hiver du blé (uniquement sur les parcelles en association la première année). Sur les parcelles en association les reliquats sont mesurés séparément sur la zone associée et sur la zone en pur. Pour les reliquats, trois horizons (0-30cm, 30-60cm et 60-90cm) sont analysés. Trois prélèvements sont effectués pour chaque horizon dans chaque zone. Les échantillons sont mélangés par horizon avant l'analyse. Les reliquats sont mesurés grâce à la méthode automatisée avec analyse en flux segmenté (NF ISO 14256-2). Pour l'analyse des données, les différentes formes d'azote minéral ( $\text{NO}_3^-$  et  $\text{NH}_4^+$ ) et les horizons du sol sont additionnés.

#### **4.2. Recueil des itinéraires techniques**

Sur ces parcelles, les itinéraires techniques mis en place par les agriculteurs sont totalement libres. Il est donc nécessaire de collecter des informations à ce sujet. Des entretiens semi-directifs ont été accomplis pour connaître le détail des interventions. Ces entretiens ont deux principaux objectifs : d'une part, il s'agit de chercher à expliquer la variabilité des effets précédents liée aux pratiques mises en œuvre sur le lupin et d'autre part, d'investiguer les interactions entre l'itinéraire technique du blé et l'effet précédent du lupin sur les performances du blé. Les informations récoltées incluent : la date des opérations, l'outil utilisé, le type et la dose de produit phytosanitaire, d'engrais ou d'amendement apporté. D'autres informations sont récoltées sur l'historique de la parcelle et notamment les précédents et leurs rendements. Enfin, les diverses remarques des agriculteurs sont relevées. Ces enquêtes sont menées en fin de campagne après la dernière intervention sur la culture mais avant la récolte. Les rendements réalisés par les agriculteurs sont enregistrés ultérieurement. Pour le détail des questionnaires voir en annexe 4.

#### **4.3. Analyse des données**

L'analyse des réseaux de parcelles permet d'avoir des résultats fidèles à la réalité et facilement transposable sur le terrain. En revanche, ce type de dispositif offre une puissance d'analyse statistique plus faible que des dispositifs étudiant des facteurs toutes choses égales par ailleurs. L'analyse des résultats est d'autant plus délicate et partielle que seule une partie des données sont disponibles, à ce jour, sur le deuxième couple d'années lupin-blé.

##### **4.3.1. Diagnostic des facteurs limitant**

Pour établir ce diagnostic, différentes étapes sont réalisées : tout d'abord i) une synthèse des résultats de chaque parcelle est rédigée, puis ii) l'agriculteur fait le diagnostic des facteurs limitants de sa parcelle, ensuite, iii) une analyse globale des parcelles est réalisée pour voir quels sont les principaux facteurs de variabilité sur le réseau, enfin iv) les résultats des deux analyses sont confrontés et discutés. Chacun de ces points est détaillé ci-dessous.

###### **4.3.1.1. Synthèse des résultats**

Le bilan individuel de chaque parcelle est d'abord effectué. Il consiste à recueillir les informations disponibles grâce aux mesures, analyses et entretiens réalisés durant les deux années de suivi pour synthétiser : les flux d'azote, la dynamique des adventices dans la succession et la mise en place du rendement et de la teneur en protéines du blé ou de l'orge. Ces données sont aussi replacées par

**Tableau 3 : Analyses statistiques**

Variable à expliquer	Variable explicative	Outil statistique ou test utilisé	Logiciel (package)
<b>Performances du blé</b>			
Rendement*, TP	Ncouv blé, Biomasse adv	Coefficient de corrélation	R
<b>Sensibilité du blé à l'effet précédent du lupin sur l'azote</b>			
Azote du couvert (pour N, ON et N-ON)	Azote restitué dans les résidus, reliquats au semis du blé, labour, MO du sol, Argile du sol	Modèle linéaire, mélange de modèles et coefficient de corrélation	R (MMIX, car)
<b>Facteurs de l'effet précédent Azote</b>			
Bilan azoté de la culture de lupin	NHI, %Ndfa, Ncouv du lupin, type de lupin et année	Coefficient de corrélation, t-test, test de Mann Whitney	R
Azote des pailles de lupin	NHI, %Ndfa, Ncouv du lupin, type de lupin et année	Coefficient de corrélation, t-test, test de Mann Whitney	R
Reliquats à la récolte et au semis du blé	Reliquats sortie hiver du lupin, azote des pailles de lupin, %Ndfa, Ncouv du lupin, type de lupin et année, Argile, MO du sol, reliquats sortie hiver du lupin	Coefficient de corrélation, t-test, test de Mann Whitney	R
<b>Effet de l'association sur l'effet précédent azote</b>			
Bilan azoté, azote des pailles, NHI du lupin, quantité d'Azote fixé, reliquats au semis et les reliquats à la récolte	Mode d'insertion en pur ou associé	Graphiques, Test de Wilcoxon	R
<b>Facteurs de la présence d'adventice dans la céréale</b>			
Biomasse d'adventice de la céréale	IFTh de la céréale, Biomasse d'adventice du lupin à floraison et à maturité, labour, nombre de déchaumage	Graphique, (coefficients de corrélation)	R
	Type de lupin et mode d'insertion en pur ou associé	Graphique, (ANOVA, test de Wilcoxon)	R
Densité et nombre d'espèces d'adventice de la céréale	Densité et nombre d'espèces du blé, modalité (pur ou associée)	Test de Wilcoxon et t-test, coefficients de corrélation	R

Ce tableau est une synthèse simplifiée des analyses statistiques réalisées pour le diagnostic. Rendement\* : rendement du blé et ses composantes, adv : adventices, ANOVA : Analyse de variance, t-test : test paramétrique de comparaison de moyenne, IFTh : Indice de fréquence de traitement herbicide, lup : lupin, MO : matières organiques, Modalité : type d'insertion du lupin (de printemps, d'hiver ou associé), N : Zone fertilisée, ON : Zone non fertilisée, Ncouv : azote du couvert, %Ndfa : part de l'azote fixé dans le lupin, RSH : reliquats à la sortie de l'hiver, TP : Teneur en protéines, Type de lupin : lupin d'hiver ou de printemps (sur la campagne 2014-2015 uniquement).

rapport aux autres parcelles du réseau. Une fiche est établie pour chaque parcelle (exemple : Annexe 5).

#### 4.3.1.2. Diagnostic de l'agriculteur

Chaque agriculteur réalise un diagnostic de sa culture de blé, lors d'un entretien semi-directif qui est effectué une fois que tous les résultats sont disponibles. Le but de cet entretien est de recueillir les impressions et le diagnostic des agriculteurs sur leurs deux campagnes. Celui-ci est d'abord établi par l'agriculteur indépendamment des analyses menées sur la parcelle.

Dans un second temps, les résultats des mesures réalisées sur sa parcelle lui sont présentés (voir fiche de l'annexe 5). A partir de ces données, l'agriculteur peut affiner son diagnostic ou faire des remarques sur les résultats qu'il trouve surprenants. Pour le détail du guide d'enquête voir en annexe 5.

Ces entretiens ont aussi pour but de comprendre et de relever quelle est la perception des agriculteurs de l'effet précédent du lupin et de sa variabilité dans leur système.

#### 4.3.1.3. Analyse globale des données du réseau

Les analyses se concentrent sur deux axes : i) L'étude de l'effet précédent azoté (*lato sensu*) du lupin sur le blé suivant et ii) l'analyse de la biomasse d'adventice à la maturité du blé en fonction de la biomasse d'adventice dans le lupin précédent. L'ensemble des analyses statistiques et des graphiques est réalisé avec le logiciel R (R Core Team, 2016).

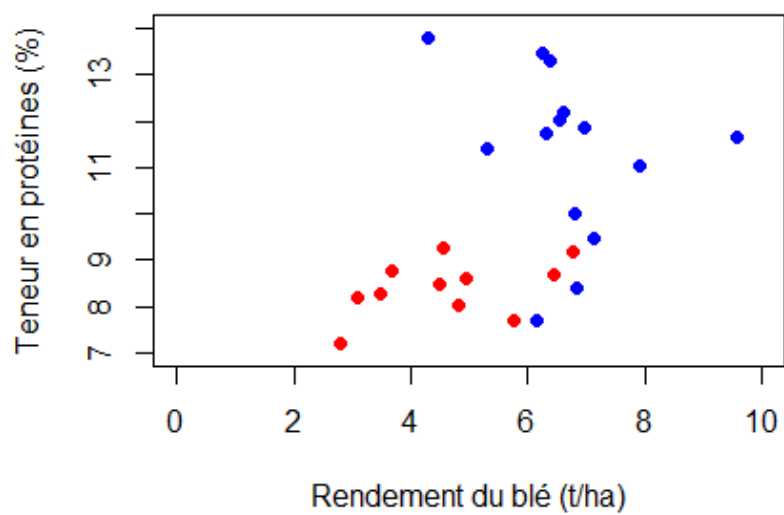
Dans un premier temps, les performances des parcelles de blé sont mises en relation avec la quantité d'azote accumulée par le blé.

Ensuite, les différentes variables impliquées *a priori* dans l'effet précédent azote *stricto sensu* (impact la disponibilité en azote) sont analysées. Le bilan azoté du lupin, la quantité d'azote des pailles, les reliquats laissés par le lupin sont présentés. Les relations entre ces variables entre elles et avec le %Ndfa, l'indice de récolte azoté (NHI) et la quantité d'azote dans le couvert du lupin sont étudiées grâce à des coefficients de corrélation. Ces analyses sont réalisées à partir de toutes les parcelles de lupin pur ayant été suivies sur un des deux couples d'années.

Par ailleurs, les données du premier couple d'années sont aussi utilisées pour voir si l'effet précédent du lupin varie entre les lupins purs d'hiver et les lupins purs de printemps, grâce à des tests de comparaison de moyennes (paramétriques ou de Mann et Whitney selon la nature des données). L'effet de l'année sur l'effet précédent du lupin d'hiver est étudié de la même manière.

La différence d'effet précédent entre les bandes pures et les associations est étudiée grâce à des graphiques et des tests de Wilcoxon.

La sensibilité du suivant à l'effet précédent azote du lupin est ensuite étudiée au travers de la quantité d'azote accumulée dans le couvert de blé. Pour expliquer cette quantité, différentes variables sont sélectionnées : i) la quantité d'azote dans les pailles restituées et les reliquats au semis qui sont, *a priori*, les deux principaux vecteurs de l'effet précédent azote des légumineuses, ii) d'autres facteurs liés à la parcelle et aux pratiques des agriculteurs et qui peuvent impacter la disponibilité en azote. Ces facteurs sont : la quantité d'azote apportée par la fertilisation, la quantité de matières organiques du sol qui peut influencer sur l'azote disponible via sa minéralisation, ainsi que la quantité d'argiles du sol et le labour qui peuvent modifier la vitesse de minéralisation de l'humus et des résidus de culture. Pour établir l'importance relative de chacune des variables explicatives sélectionnées sur la quantité d'azote accumulée par le blé, trois mélanges de modèles sont réalisés : un pour expliquer l'accumulation d'azote par le blé dans la zone fertilisée, un autre pour la zone non fertilisée et un pour le différentiel entre les deux. Ces mélanges de modèles sont basés sur la détermination du poids d'Akaike (Burnham et Andersen, 2002; Makowski et Monod, 2011) ; cette méthode a déjà été appliquée au DAR par Casagrande *et al.* (2009). Ils sont réalisés grâce au package « MMIX » (Morfin et Makowski, 2010). En complément de ces analyses, les coefficients et la probabilité critique du modèle présentant le meilleur AIC (Akaike, 1973) sont analysés. Sur ce modèle, une analyse des résidus est aussi réalisée. Elle comprend l'analyse visuelle des résidus studentisés, l'analyse de la normalité grâce au test de Kolmogorov-Smirnov, l'étude des VIF des différentes variables ainsi que le test de Durbin et Watson grâce au package « car » (Fox et Sanford, 2011). Des analyses de corrélation sont aussi réalisées sur ces variables et sur les autres indicateurs de l'effet précédent comme le bilan azoté (Tableau 3). Ces



**Figure 7 : Rendement et teneur en protéines des blé du réseau**

Chaque rond rouge : correspond à la zone non fertilisée d'une parcelle et chaque rond bleu : à la zone fertilisée. Seules les valeurs de la campagne 2015-2016 sont disponibles.

analyses ne sont réalisées qu'à partir des parcelles conduites en lupin pur, dont les suivants sont des blés ; seules les parcelles du premier couple lupin-blé (2014-2016) sont donc disponibles.

D'autre part, la biomasse d'adventice et la quantité d'azote du couvert de blé sont mises en relation avec le rendement, ses composantes et la teneur en protéines des blés.

Les facteurs influençant la biomasse d'adventice dans le blé sont étudiés au travers de coefficient de corrélation. Ces analyses sont effectuées à partir des données de toutes les parcelles du premier couple lupin-céréale (2014-2016) sur lesquelles une culture de céréale à paille a été étudiée.

Pour compléter cette analyse, les données de comptages réalisés sur les trois parcelles sont analysées pour mettre en relation les populations d'adventice du lupin et celles du blé suivant. Des tests de Wilcoxon sont aussi réalisés pour voir si des différences entre bande pure et association sont détectables.

L'ensemble des analyses effectuées est synthétisé dans le Tableau 3.

#### 4.3.1.4. *Confrontation et discussion des résultats*

A l'issue de ces analyses, on cherche à voir si les résultats du diagnostic des agriculteurs et de l'analyse des données sont cohérents. Les résultats et décalages observés sont discutés au regard de la bibliographie disponible.

Enfin, à partir de ces résultats, des pratiques qui pourraient être favorables à de meilleures performances des blés de lupin sont identifiées.

## 5. Résultats

### 5.1. Perceptions et pratiques des agriculteurs du réseau

#### 5.1.1. Perception de l'effet précédent du lupin sur le blé par les agriculteurs

Il ressort des entretiens réalisés<sup>1</sup> avec les agriculteurs que les motivations pour produire du lupin sont diverses et souvent multiples. Ainsi, certains agriculteurs choisissent cette culture pour la marge ou le prix de vente (5 agriculteurs sur 9), d'autres pour des raisons d'organisation du travail (2/9), mais globalement, il ressort pour tous les agriculteurs interrogés que la rotation, la rupture du cycle des bioagresseurs ou la diversification est la principale raison qui les a amenés à produire du lupin.

L'effet précédent du lupin et son impact positif sur le rendement du blé sont en effet cités ou reconnus par tous les agriculteurs. Néanmoins, dans le cas précis de cette campagne, l'effet précédent ne s'est pas toujours fait sentir. Il a même parfois été perçu comme négatif.

L'effet azote est globalement considéré comme réel par les agriculteurs (7/9), bien que la perception de cet effet soit très variable de 10 à 50 u disponibles pour la céréale suivante. Sur le couple d'années étudié il leur semble que la forte part prise par le triticale dans l'association ait pu nuire fortement à l'effet précédent azote des lupins associés. Enfin, deux agriculteurs considèrent qu'il n'y a pas d'effet précédent azote des légumineuses, l'un d'eux considère que « ces cultures appauvrissent les sols ». Il est à noter que ces deux agriculteurs exportent les pailles de lupins.

Outre l'effet azote, l'allongement des délais de retour et la coupure du cycle des bioagresseurs sont aussi souvent évoqués. La réduction de l'impact du piétin échaudage est citée par cinq des neuf agriculteurs interrogés. Néanmoins, un agriculteur craint que l'association qu'il a mise en place ne permette pas de couper le cycle des bioagresseurs des céréales en raison de la présence du triticale.

Chez les agriculteurs, il existe un consensus sur le caractère salissant du lupin à la fois à l'échelle de la campagne et de la rotation. Le manque de matières actives autorisées, le faible développement du lupin en début de cycle et sa faible couverture du sol avant la récolte sont cités comme étant les principales causes de ce salissement. Par ailleurs, la gestion des adventices n'est pas considérée comme impossible par tous les agriculteurs. Les facteurs à même de faire varier l'enherbement des parcelles cités par les exploitants sont : le stock semencier de la parcelle, l'utilisation plus importante ou mieux ciblée des produits phytosanitaires, la météo et le travail du sol avant la mise en place du lupin. Néanmoins, les agriculteurs notent que le climat de la campagne du lupin 2014-2015 était défavorable au développement des adventices, sauf pour les lupins de printemps.

Par ailleurs, d'autres effets précédents ont été cités par les agriculteurs, notamment l'effet positif du lupin sur la structure du sol grâce à son système racinaire pivotant (cité par 3 agriculteurs sur 9), et

---

<sup>1</sup> Les entretiens présentés ici ont tous été réalisés sur des agriculteurs ayant été suivis sur le premier couple d'années (campagnes 2014-2015 et 2015-2016)

**Tableau 4 : Variabilité des performances du blé dans le réseau en 2016**

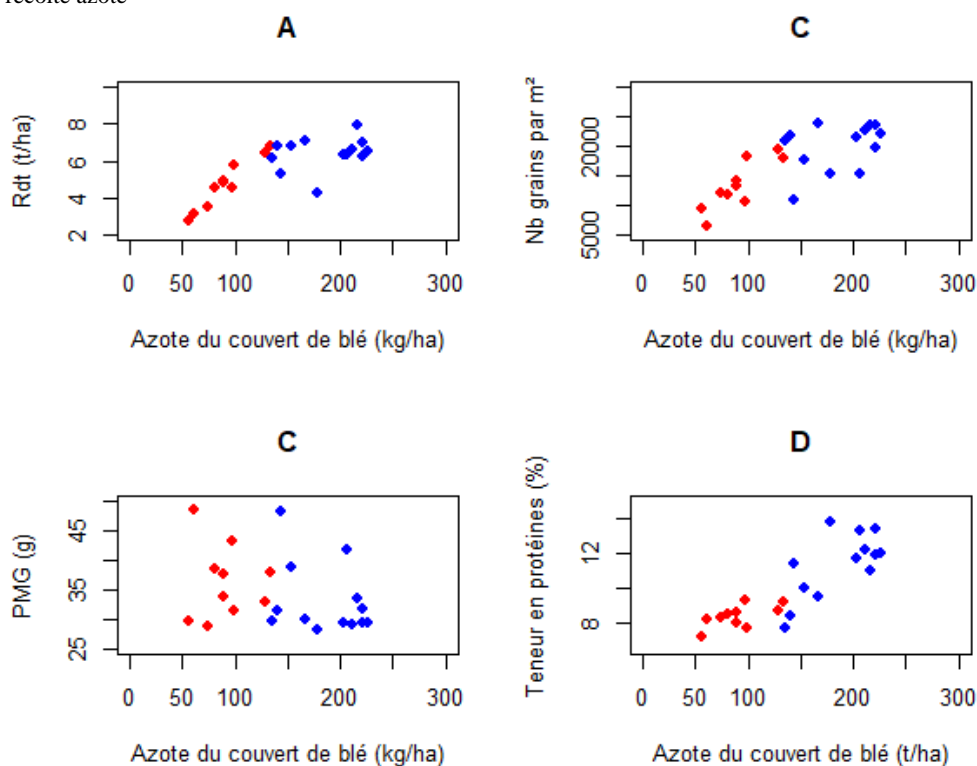
	Moyenne	Minimum	Maximum	CV
<b>Zone fertilisée (N)</b>				
Rendement (t /ha)	6,6	4,3	9,5	18%
Nb pieds par m <sup>2</sup>	211	93	211	27%
Nb grains par m <sup>2</sup>	20 549	10 941	29 190	22%
PMG (g)	33	28	48	18%
TP (%)	11,3	7,6	13,8	16%
<b>Zone non Fertilisée (0N)</b>				
Rendement (t /ha)	4,6	2,7	6,7	29%
Nb grains par m <sup>2</sup>	13 049	6 339	19 599	31%
PMG (g)	36	29	49	16%
TP (%)	8,4	7,2	9,2	7%

Ces valeurs sont issues du premier couple d'années (précédents purs et associés). Nb : Nombre, TP : Teneur en protéines, PMG : Poids de mille grains, CV : Coefficient de variation. Seules les valeurs de la campagne 2015-2016 sont disponibles.

**Tableau 5 : Variabilité des indicateurs de l'effet précédent azote**

	Moyenne	Minimum	Maximum	CV
Bilan (kg N /ha)	-19	-93	77	-
Azote du couvert de lupin (kg/ha)	239	51	392	41%
NHI (%)	79	54	92	18%
Quantité d'azote des grains (kg/ha)	178	47	260	34%
%Ndfa (%)	70	34	98	26%
Quantité d'azote fixée (kg/ha)	156	50	281	43%
Azote des pailles (kg/ha)	61	4	166	89%
Reliquats à la récolte (kg/ha)	69	8	146	70%
Reliquats au semis du blé (kg/ha)	133	44	254	39%

Ces valeurs sont issues des deux couples d'années (quel que soit le suivant du lupin), les lupins associés en sont exclus. %Ndfa : la part de l'azote du lupin en provenance de l'air, Bilan : le bilan azoté du lupin, CV : coefficient de variation, NHI : indice de récolte azoté



**Figure 8 : Liens entre l'azote du couvert et les composantes du rendement du blé (A, B, C) et sa teneur en protéines (D)**

Ces valeurs sont issues du premier couple d'années (précédents purs et associés). Rdt : rendement, Nb : nombre, PMG : poids de mille grains, Azote du couvert de blé : quantité d'azote dans le couvert de blé à maturité. Un point correspond à une parcelle, en rouge : la zone non fertilisée, en bleu : la zone fertilisée.

son effet sur la mobilisation d'éléments minéraux du sol pour le suivant, comme le phosphore (1/9). Ces deux éléments font d'ailleurs dire à un agriculteur qu'après un premier lupin, la parcelle « n'est plus la même ».

Cinq agriculteurs (sur 9) ont décidé d'arrêter la production de lupin en raison de la baisse du prix de vente, de la difficulté à obtenir un « bon rendement » et de la complexité de gestion des adventices dans la culture de lupin et de blé qui suit.

### **5.1.2. Adaptation des Itinéraires techniques**

La plupart des agriculteurs adaptent leur fertilisation après un lupin (7/9). Le plus souvent ils utilisent des OAD (outils d'aide à la décision) comme Fertilio Sat, la méthode Jubil, ou Farmstar.

La mise en place du binage questionne certains agriculteurs qui y voient un bon moyen pour lutter contre les adventices dans le lupin et donc réduire leurs IFT à l'échelle de la succession. Seul un agriculteur la pratique dans les parcelles étudiées dans ce réseau.

Certains agriculteurs disent être obligés d'augmenter les doses ou le nombre de passages d'herbicide dans les blés de lupin par rapport à un autre blé (4/9).

Les perceptions des agriculteurs et leurs pratiques sont très variables dans le réseau. Voyons ce qu'il en est pour les performances de leurs blés.

## **5.2. Variabilité des performances du blé après un précédent lupin**

On observe une forte variabilité des résultats sur cette première année de suivi du blé, avec des rendements allant de 4,3 à 9,5 t/ha (CV=18%), sur les douze parcelles du réseau conduites selon les itinéraires techniques déterminés par les agriculteurs (blés fertilisés de 105 à 279 u pour une moyenne de 180 u), pour une valeur moyenne de 6,6 t/ha. La variabilité est amplifiée sur les zones non fertilisées (sur onze parcelles) dont les rendements sont plus faibles et s'échelonnent de 2,7 à 6,7 t/ha avec une moyenne de 4,6 t/ha et un coefficient de variation de 29%. Le nombre de grains par m<sup>2</sup> est plus variable que le poids de mille grains (PMG) (Figure 7 et Tableau 4). L'écart entre la zone fertilisée et la zone non fertilisée est extrêmement variable : il s'échelonne de -0,7 à 4,3 t/ha pour une moyenne de 1,5 t/ha.

La teneur en protéines des grains de blé fertilisés varie de 7,7 à 13,8% (CV=16%). Ce taux est plus faible sur les blés non fertilisés : 8,4% en moyenne et il est beaucoup moins variable (CV=7,4%) (Figure 7 et Tableau 4). Les bandes non fertilisées ont donc simultanément un faible rendement et une faible teneur en protéines. L'écart entre la zone fertilisée et la bande non fertilisée varie de 0,8 à 5,2% pour une moyenne de 3,2%.

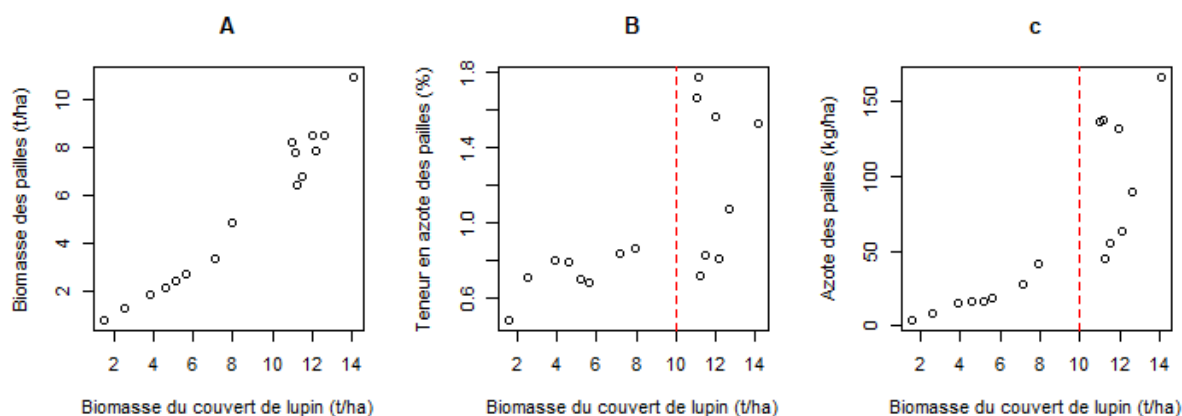
## **5.3. Variabilité de l'effet précédent azote**

### **5.3.1. Rôle de l'azote dans la variabilité des performances du blé**

La quantité d'azote dans le couvert de blé à la récolte varie aussi fortement : de 55 à 133 kg d'azote par ha pour la zone non fertilisée (0N) et de 135 à 284 kg pour la zone fertilisée (N). Si on exclut les parcelles en association, ces chiffres restent sensiblement les mêmes à savoir de 60 à 133 sur la zone 0N et de 140 à 284 sur la zone N avec des coefficients de variation de respectivement 25 et 22%. La différence entre la zone fertilisée et non fertilisée est de 96 kg/ha en moyenne et s'échelonne de 20 à 141 kg/ha.

Le rendement du blé est corrélé avec la quantité d'azote accumulée par son couvert. Le rendement de la zone sans azote est significativement corrélé à la quantité d'azote accumulée par le couvert de blé (Coef=0,93 p-value<0,001). Dans une moindre mesure, il en va de même pour la zone fertilisée (Coef=0,58, p-value=0,029) (Figure 8 A). Le nombre de grains par m<sup>2</sup> est lui très corrélé avec la quantité d'azote du couvert de blé (pour 0N : Coef=0,86, p-value<0,001) et pour N : Coef=0,58, p-value=0,029) (Figure 8 B). Enfin, le PMG n'est lui pas lié à l'accumulation d'azote par le couvert de blé pendant son cycle (pour 0N : Coef= -0,04, p-value=0,89 et pour N : Coef= -0,25, p-value=0,38) (Figure 8 C).

Pour ce qui est de la teneur en protéines elle est aussi corrélée positivement avec la quantité d'azote dans le couvert de blé à la récolte (pour 0N : Coef=0,59, p-value=0,057 et pour N : Coef= 0,59, p-value=0,025) (Figure 8 D).



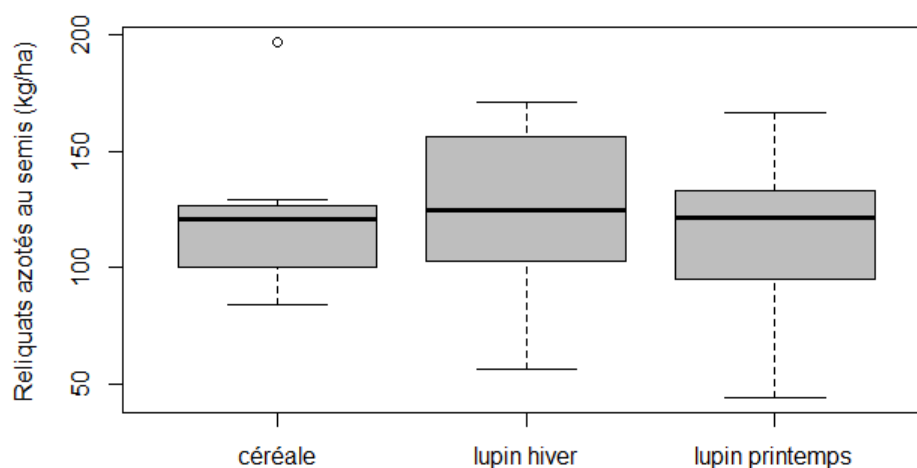
**Figure 9 : Impact de la biomasse du lupin sur la biomasse de paille (A), la teneur en azote des pailles (B) et la quantité d'azote des pailles de lupin (D)**

Ces valeurs sont issues des deux couples d'années (quel que soit le suivant du lupin), les lupins associés en sont exclus.

**Tableau 6 : Effet du type de lupin d'hiver ou de printemps et de l'année sur l'effet précédent du lupin**

Variable	Effet de l'année	p-value	Effet du type de lupin (Lupin d'hiver- de printemps)	p-value
Bilan (kg/ha)	NS	0,24	NA	NA
%Ndfa (%)	NS	0,10	NS	0,73
NHI (%)	NS	0,28	-20	0,0025 **
NcouvL (kg/ha)	NS	0,71	164	0,0025**
Npailles (kg/ha)	NS	0,28	81	0,006**
Nsem (kg/ha)	NS	0,39	NS	0,44
Nrec (kg/ha)	NS	0,07	NA	NA

Ce tableau reprend les différences et les probabilités associées aux tests paramétriques de comparaison de moyenne et des tests de Mann et Whitney étudiant l'effet de l'année sur l'effet précédent des lupins d'hiver et l'effet du type de lupin sur l'effet précédent azote du lupin. Ces valeurs sont issues des deux couples d'années (quel que soit le suivant du lupin), les lupins associés en sont exclus. NA : absence de données pour réaliser le test, %Ndfa : la part de l'azote du lupin en provenance de l'air, Bilan : le bilan azoté du lupin, NcouvL : Azote du couvert de lupin à maturité, NHI : indice de récolte azoté, Npailles : quantité d'azote dans les pailles de lupin, NS : différence non significative, Nsem : reliquats au semis du blé, p-value : probabilité critique associée aux tests.



**Figure 10 : Reliquats aux semis d'une culture d'hiver après différents précédents**

Reliquats mesurés sur les parcelles à l'automne 2015. Céréales : reliquats au semis du lupin d'hiver après une orge ou un blé (n=8), lupin d'hiver : reliquats au semis du blé ou de l'orge après une culture de lupin d'hiver (n=8) et lupin de printemps : reliquats au semis d'un blé ou d'une orge après un lupin de printemps (n=7)



La différence d'accumulation d'azote entre un blé de lupin pur et un blé de lupin associé n'est pas présentée car trop peu de données sont disponibles (deux parcelles).

Nous décomposons l'effet précédent *lato sensu* du lupin sur la fourniture d'azote en deux parties : l'effet précédent *stricto sensu* qui est l'impact du lupin sur le milieu physique (en se centrant ici sur la disponibilité en azote) et la sensibilité du suivant à ces effets.

### 5.3.2. Effet précédent du lupin pur sur la fourniture potentielle d'azote

#### - Bilan azoté du lupin

Le bilan azoté ( $N_2$  fixé – Azote des grains) des parcelles de lupin pur est très variable : de -93 à 77 kg/ha selon les parcelles pour une moyenne de -19kg, on notera que ce chiffre ne prend en compte que les parties aériennes de la plante (Tableau 5).

Le lupin a la capacité d'accumuler des quantités d'azote importantes (239 kg/ha en moyenne) mais avec une forte variabilité (de 51 à 392 kg/ha, CV=41%).

La quantité d'azote exportée dans les grains varie de 47 à 260 kg/ha selon les parcelles (moyenne=178 kg/ha, CV=34%). Le NHI s'étend lui de 54 à 92%. Il apparaît comme étant négativement corrélé à la biomasse du lupin (Coef=-0,77, p-value<0,001).

La quantité d'azote provenant de la fixation de l'azote atmosphérique varie de 50 à 281kg/ha. Elle est aussi corrélée à la biomasse aérienne (Coef=0,67, p-value=0,006). En moyenne 21,5 kg/ha de  $N_2$  sont fixés par tonne de biomasse aérienne ; ce chiffre varie de 9 à 32kg/t selon les parcelles. Le %Ndfa oscille de 34 à 98% pour une moyenne de 70%. On remarque que le %Ndfa (CV=26%) est moins variable que la quantité d'azote fixé en kg d'azote par ha (CV=43%).

Le bilan azoté est fonction du NHI, du %Ndfa et de la quantité d'azote dans le couvert de lupin. Parmi ces trois variables, seules le %Ndfa impacte significativement le bilan azoté du lupin (Coef=0,69, p-value=0,004).

L'année n'a pas d'impact significatif sur la variabilité ni sur le bilan et ni sur aucun des indicateurs des effets précédents du lupin d'hiver sur le blé suivant (Tableau 6).

#### - Azote des pailles de lupin

La quantité d'azote contenue dans les pailles varie de 4 à 166 kg/ha pour un coefficient de variation de 89%. Les pailles des lupins purs sont généralement restituées, à l'exception d'une parcelle la première année. La quantité d'azote des pailles est très corrélée négativement au NHI (Coef= -0,98, p-value<0,001). Elle est aussi très liée à la biomasse du couvert (Coef=0,83, p-value<0,001, Figure 9 C), ce qui s'explique à la fois par le fort lien entre la biomasse du lupin et la quantité d'azote du couvert de blé (Figure 9 A) et par la teneur en protéines qui augmente fortement pour certaines parcelles ayant des biomasses de lupin supérieures à 10 t/ha (Figure 9 B).

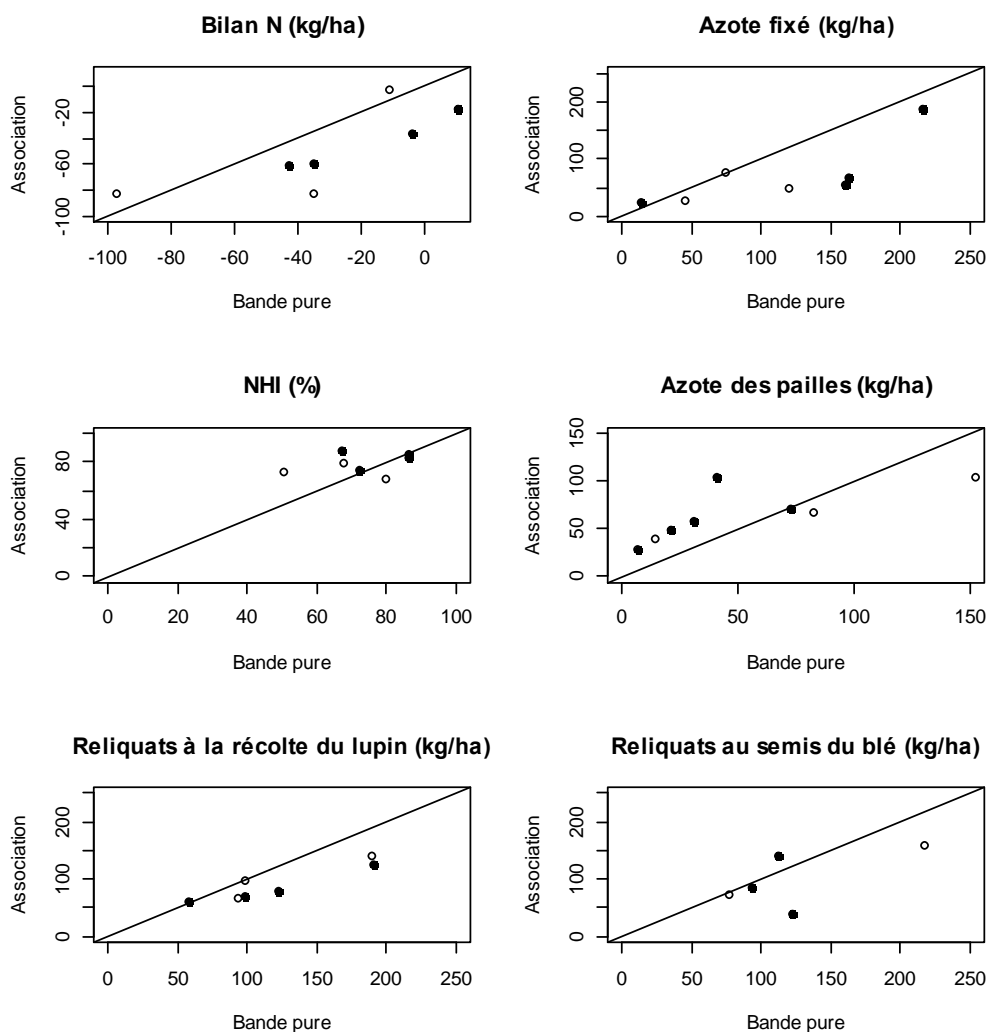
La quantité d'azote contenue dans les adventices reste assez limitée de 2 à 54 kg/ha pour une moyenne de 19kg/ha. Cet azote ne participe pas au bilan puisqu'il est restitué au système. L'azote des adventices est ajouté à l'azote des pailles restituées pour l'analyse de la sensibilité du suivant aux effets précédents du lupin.

#### - Reliquats

Les reliquats à la récolte du lupin sont élevés (69 kg/ha en moyenne). Ils sont très variables (CV=70%), plus qu'au semis du suivant (CV=39%) (Tableau 5). Les reliquats entre la récolte du lupin et le semis du blé doublent presque, passant de 69 à 133 kg/ha en moyenne. Ces reliquats ne sont pas significativement liés entre eux (Coef=0,04, p-value=0,91). Aucune variable potentiellement explicative ne semble significativement liée aux reliquats à la récolte du lupin (données non présentées).

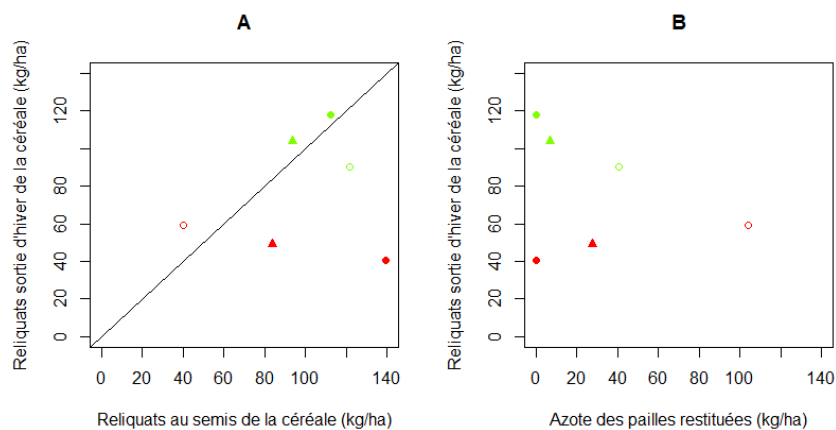
Les reliquats au semis du blé semblent plus facilement explicables. Ils sont négativement corrélés au NHI (Coef=-0,64, p-value=0,01) et liés à la quantité d'azote des pailles du lupin (Coef=0,53, p-value=0,04). Ils sont aussi corrélés au %Ndfa (Coef=-0,59, p-value=0,02). La quantité d'azote dans le couvert de lupin, le bilan azoté du lupin, la teneur en matières organiques du sol et la proportion d'argile dans le sol n'ont pas un impact significatif sur ces reliquats.

Il est aussi notable que sur ce réseau les reliquats au semis des cultures d'automne sont globalement élevés et ne diffèrent pas entre les différents types de précédents (Céréales ou lupin, Figure 10).



**Figure 11: Différences d'effet précédent entre un lupin en culture pure et associé à un triticale**

Ces graphes présentent la valeur des différentes variables pour le lupin associé d'une parcelle en fonction de la valeur de cette variable sur la bande pure de la même parcelle. Chaque point représente donc une parcelle, les points pleins sont les parcelles du premier couple d'années, les ronds vides : les parcelles du second couple d'années. NHI : indice de récolte azoté.



**Figure 12 : Reliquats à la sortie de l'hiver du blé en fonction des reliquats au semis du blé (A) et de la quantité d'azote restituée au système dans les pailles du précédent (B)**

Cette figure ne reprend que les trois parcelles ayant été conduites en association (en rouge) durant le premier couple d'années et leur bande pure (en vert). Les ronds vides représentent la parcelle d'orge d'hiver, les ronds et les triangles pleins symbolisent respectivement deux parcelles de blé différentes.

### 5.3.3. Effet précédent des différents types de lupin

On notera que les lupins de printemps ont des NHI plus élevés et accumulent moins d'azote dans leur couvert que les lupins d'hiver (Tableau 6). Il en résulte que la quantité moyenne d'azote contenue dans les pailles qui est de 97 kg/ha en moyenne pour un lupin d'hiver chute à 15 kg/ha pour les lupins de printemps. Les %Ndfa et les reliquats au semis du suivant ne semblent pas différer (Tableau 6).

### 5.3.4. Effet précédent du lupin associé

Les parcelles de lupin associé à un triticale sont comparées à leurs bandes pures (mise en place sur chaque parcelle). Le bilan azoté des parcelles en association est globalement plus déficitaire que celui des bandes pures (Non significatif p-value du test de Wilcoxon= 0,08) (Figure 11). Il semble aussi que les associations captent globalement moins d'azote atmosphérique par unité de surface (p-value= 0,08) (Figure 11), même si leur %Ndfa semble légèrement plus élevé que pour le lupin pur (p-value=0,051). Il semble que le NHI du lupin varie peu ou soit légèrement favorisé par l'association (p-value=0,37) et que la quantité d'azote potentiellement restituée au système via les pailles ne soit pas différente entre les deux modalités (p-value=0,31). Néanmoins, la concentration en azote des pailles est nettement plus faible pour les associations (lupin et triticale) que pour les zones en lupin pur (p-value=0,008). On notera aussi que la quantité d'azote restituée par l'association semble plus stable que la quantité fournie par le lupin pur (Figure 11). Les reliquats à la récolte sont significativement plus faibles après une association (91 kg/ha en moyenne) qu'après un lupin pur (121 kg/ha en moyenne) (p-value=0,04) (Figure 11). Cette différence n'est plus significative au semis du suivant (p-value=0,31), mais moins de parcelles ont été analysées pour cette mesure.

Par ailleurs, on remarque que les reliquats à la sortie de l'hiver après une association sont plus faibles qu'après une culture pure. La différence entre les reliquats sortie hiver et les reliquats au semis des céréales après des lupins associés semble plus variable pour les associations (Figure 12 A). On observe aussi qu'indépendamment de la modalité, les reliquats sortie hiver ne semblent pas corrélés à l'azote restitué via les pailles (Figure 12 B).

### 5.3.5. Sensibilité de la quantité d'azote accumulée par le blé aux variations de l'effet précédent du lupin

Afin d'identifier et de hiérarchiser les facteurs de variation de la quantité d'azote accumulée par le couvert de blé, des analyses de corrélation et des mélanges de modèles sont réalisés.

Il en ressort que l'accumulation d'azote par le couvert de blé non fertilisé n'est significativement corrélée à aucun facteur étudié (Tableau 7). Pour ce qui est de la zone fertilisée la quantité d'azote accumulée par le blé est positivement liée à la dose d'azote apportée par la fertilisation (Coef= 0,83 p-value<0,001). Les autres variables ne montrent pas d'effets significatifs (données non présentées).

Les mélanges de modèles montrent que les variables expliquant le mieux l'accumulation d'azote du couvert de blé sans fertilisation sont la quantité d'azote restituée via les pailles, la quantité d'argile du sol et dans une moindre mesure la quantité de matières organiques. Le labour et les reliquats au semis du blé ont des poids d'Akaike ( $w_i$ ) inférieurs à 0,5 (Tableau 8). Le modèle linéaire regroupant les trois variables ayant des  $w_i$  supérieurs à 0,5 explique 18% de la variabilité du réseau (p-value du modèle : 0,14).

Pour ce qui est des zones fertilisées, il ressort que les principaux facteurs influant sur la quantité d'azote dans le couvert de blé à maturité sont la fertilisation azotée, le labour et, dans une moindre mesure, le taux de matières organiques du sol. Le modèle linéaire regroupant la fertilisation et le labour est significatif (p-value<0,001) et explique 77% des variations observées. La valeur du différentiel entre la zone fertilisée et non fertilisée est quant à elle principalement expliquée par la dose d'azote apportée par hectare (effet positif) et la quantité d'argile (effet positif). Il semble que la quantité de matières organiques, la quantité d'azote restituée dans les résidus de lupin et les reliquats au semis aient un rôle plus limité dans l'explication de cette différence (Tableau 8). Le modèle linéaire regroupant ces cinq variables explique 69% de la variabilité observée (p-value=0,06). Dans ce modèle seul l'effet de la fertilisation est significatif.

L'impact de la quantité d'adventice dans le blé sur l'accumulation d'azote par le blé a été étudié par ailleurs. Il semble que son impact soit négligeable dans cette expérimentation (données non présentées). Il n'a pas été intégré à ces analyses afin de ne pas perdre en puissance statistique. De

**Tableau 7 : Corrélation entre la quantité d'azote accumulé par le blé non fertilisé et les variables mesurées**

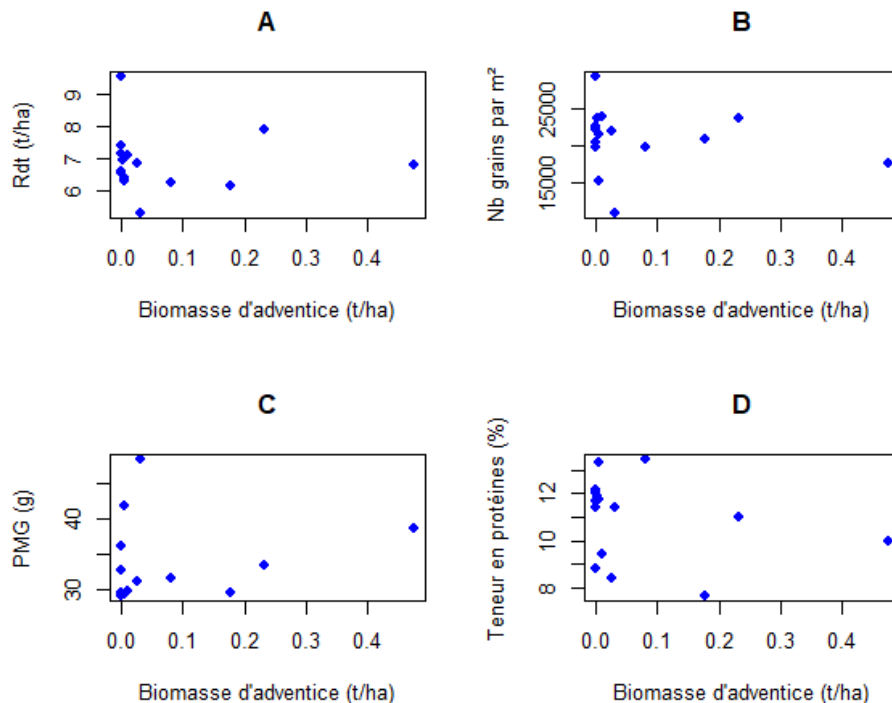
Variable	Corrélation	p-value
Bilan	0,13	0,75
%Ndfa	0,22	0,60
NHI	0,12	0,75
NcouvL	0,15	0,69
Nrest	0,53	0,14
Nsem	0,08	0,83
Qte Arg	-0,51	0,16
Qte MO	-0,17	0,65

Ces corrélations sont basées sur l'analyse des résultats des parcelles du premier couple d'années uniquement, les lupins associés en sont exclus. %Ndfa : la part de l'azote du lupin en provenance de l'air, Bilan : le bilan azoté du lupin, Corrélation : coefficient de corrélation linéaire des variables avec la quantité d'azote dans le couvert de blé à maturité, NcouvL : Azote du couvert de lupin à maturité, NHI : indice de récolte azoté, Nrest : quantité d'azote dans les pailles (et les adventives) restituée après la culture de lupin, Nsem : reliquats au semis du blé, Prof : profondeur du sol, p-value : probabilité critique associée au coefficient de corrélation, Qte Arg : proportion d'argile dans le sol, Qte MO : taux de matières organiques du sol.

**Tableau 8 : Mélanges de modèles expliquant la quantité d'azote du couvert de blé à maturité**

	Zone non fertilisée (0N)		Zone fertilisée (N)		Différentiel (N-0N)	
	Paramètre	wi	Paramètre	wi	Paramètre	wi
Nrest	<b>0,58</b>	<b>0,86</b>	0,10	0,44	<b>-0,42</b>	<b>0,56</b>
Qte_Arg	<b>-3,9</b>	<b>0,85</b>	<b>0,28</b>	<b>0,63</b>	<b>7,1</b>	<b>0,87</b>
Qte_MO	<b>13</b>	<b>0,53</b>	-7,9	0,40	<b>-39</b>	<b>0,77</b>
FertiN	-	-	<b>0,67</b>	<b>1,00</b>	<b>0,48</b>	<b>0,86</b>
Labour	5,9	0,42	<b>39</b>	<b>0,79</b>	12	0,41
Nsem	0,04	0,34	0,06	0,43	<b>0,11</b>	<b>0,52</b>

Ces mélanges de modèles sont basés sur l'analyse des résultats des parcelles du premier couple d'années uniquement, les lupins associés en sont exclus. FertiN : dose d'azote apportée sur la zone fertilisée, Labour : effet du labour entre le lupin et le blé, Nrest : quantité d'azote dans les pailles (et les adventives) restituées après la culture de lupin, Nsem : reliquats au semis du blé, Qte Arg : proportion d'argile dans le sol, Qte MO : taux de matières organiques du sol, wi : Poids d'Akaike.

**Figure 13 : Rendement et composantes du rendement du blé en fonction de la biomasse d'adventice**

Rdt : rendement, Nb : nombre, PMG : poids de mille grains. Aucun de ces variables n'est corrélée à la biomasse d'adventice. Un point correspond à une parcelle fertilisée. Ces valeurs sont issues du premier couple d'années (Orge et blé, précédents purs et associés). La parcelle avec le plus fort salissement est exclue.

même, l'impact des autres bioagresseurs a été exclu en raison de leur très faible variabilité dans le réseau.

## **5.4. Etude de l'enherbement de la céréale**

### **5.4.1. Variabilité de la biomasse d'adventice et son effet sur les performances du blé**

Parmi les bioagresseurs, seuls les adventices sont présentés ici, car l'incidence des autres bioagresseurs est très peu variable dans les parcelles de céréale étudiées. Sur le réseau, la biomasse d'adventice à la récolte de la céréale (blé ou orge) varie de 0 à 211 g/m<sup>2</sup> avec une moyenne de 19 g/m<sup>2</sup> et une médiane de 0,7 g/m<sup>2</sup>. Globalement les parcelles ne présentent pas de fortes biomasses d'adventice. Seul un quart des parcelles en ont plus de 10g/m<sup>2</sup>.

Si on exclut la parcelle avec le plus fort salissement (211 g/m<sup>2</sup> d'adventice, soit plus de quatre fois plus que la deuxième parcelle ayant la plus forte biomasse de mauvaises herbes), la biomasse d'adventice n'est significativement corrélée ni avec le rendement, ni avec aucune composante de rendement, de même elle n'est pas liée à la teneur en protéines du blé (Figure 13).

### **5.4.2. Facteurs influençant la biomasse d'adventice dans la céréale suivante**

Le salissement du lupin de l'année précédant le blé est beaucoup plus variable que celui de la céréale puisqu'il allait de 0 à 626 g/m<sup>2</sup> avec une moyenne de 125 et une médiane de 44g/m<sup>2</sup>. Il ne se dégage pas de liens statistiquement significatifs entre la biomasse d'adventice du lupin et celle de la céréale qui le suit. Néanmoins, on observe une tendance avec un coefficient de corrélation de 0,255 (p-value = 0,08). Il semble que lorsqu'une parcelle a eu un fort salissement l'année du lupin, elle est légèrement plus susceptible d'avoir une forte biomasse d'adventice dans le blé suivant (Figure 14).

Sur le couple d'années étudié, les lupins de printemps et les bandes pures des cultures associées ont nettement décroché avec des biomasses d'adventice avoisinant les 200g/m<sup>2</sup> : respectivement 173 et 183g/m<sup>2</sup> contre 10g/m<sup>2</sup> pour les lupins d'hiver purs et associés. Pour les lupins de printemps et les bandes pures les salissements sont très variables d'une parcelle à l'autre (Figure 15 A). Il semble aussi que les blés suivant un lupin de printemps aient de plus fortes biomasses d'adventice, mais en réalité cette différence n'est due qu'à deux parcelles qui ont une biomasse d'adventice de 211 et 47 g/m<sup>2</sup> et qui n'ont, de plus, pas été labourées (Figure 15 B).

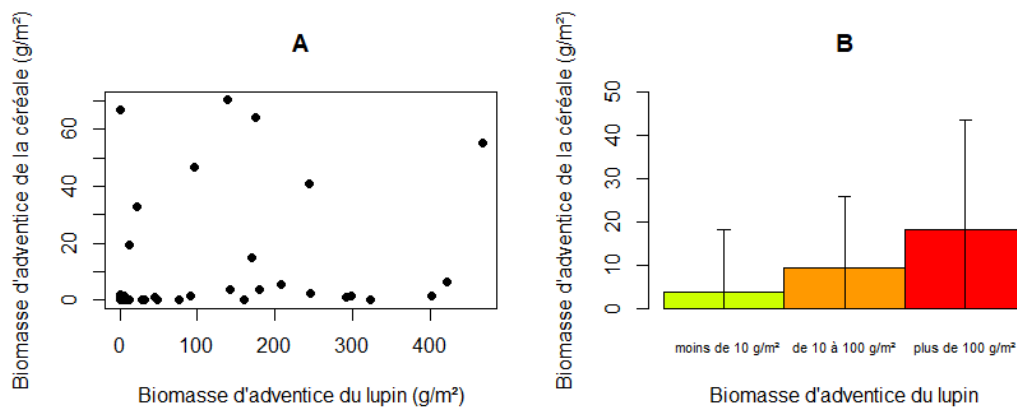
Le travail du sol semble réduire la biomasse d'adventice, mais cette différence (faible) est liée aux deux parcelles de lupin de printemps évoquées précédemment (Figure 16).

La corrélation entre l'IFT herbicide et la biomasse d'adventice de la céréale est très faible (Coef=-0,06, p-value=0,83, Figure 17 A et B). Néanmoins, il est notable que les quatre parcelles avec les plus forts IFTH (de 2,9 à 3,6) ont toutes une biomasse d'adventice inférieure à 0,5g/m<sup>2</sup>. On n'observe pas non plus de tendance liant l'IFTH du blé à la biomasse d'adventice du précédent (Coef=-0,29, p-value=0,27, Figure 17 C).

### **5.4.3. Facteurs influençant la densité et la structure des populations d'adventice**

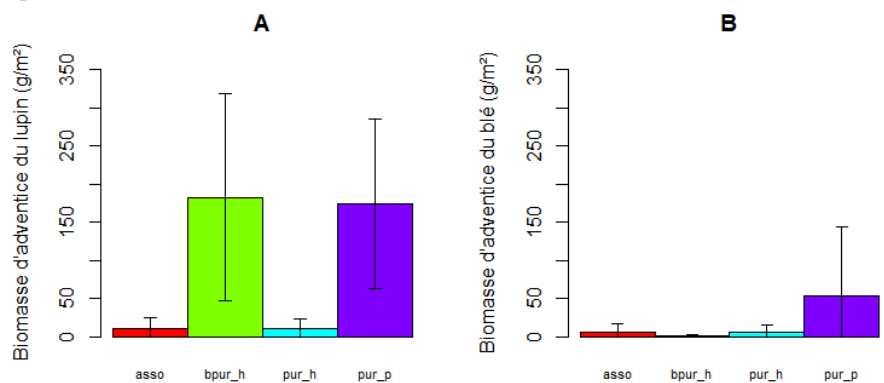
Des comptages et des déterminations des adventices ont été réalisés sur trois parcelles d'association du second couple d'années et leurs bandes pures (Pour P206 la bande pure est une autre parcelle proche : la P202). En termes de nombre d'espèces, il ne semble pas se dégager de différences entre un blé suivant une association et une bande pure (Figure 18 A). De plus, seule une faible part (entre 0 et 33% selon les zones) des espèces présentes dans le blé l'était aussi dans le lupin qui précédait. Il ne semble pas y avoir de différence entre l'association et la bande pure pour ce pourcentage (Figure 18 C). Il n'y a pas de lien de corrélation significative entre le nombre d'espèces dans le blé et dans le lupin qui le suit (Figure 18 D).

Pour ce qui est de la densité d'adventice, il ne semble pas y avoir de différence entre la bande en pur et associée, mais un fort effet parcelle semble se dégager (Figure 18 B). La part de la densité d'adventice composée d'espèces déjà présentes dans le lupin varie de 0 à 67% selon les zones, pour 22% en moyenne. Il ne semble pas y avoir de différence entre les deux modalités (Figure 18 D). Pour ce qui est du lien entre la densité d'adventice des deux années, il apparaît que la densité d'adventice de la céréale est corrélée avec la densité d'adventice du lupin qui le précède sur la bande pure (Coef=0,92, p-value<0,001), mais cette corrélation n'est pas vérifiée pour la culture associée (Coef=0,55, p-value=0,12) (Figure 18 E).



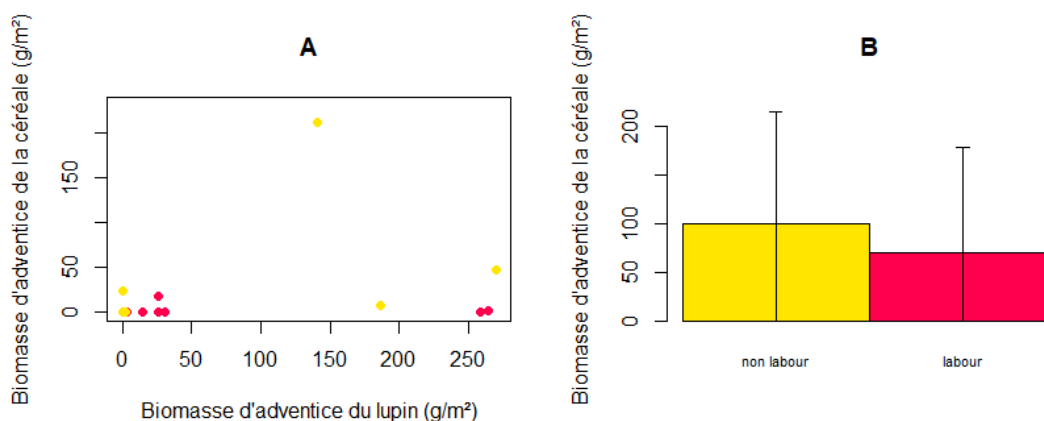
**Figure 14 : Biomasse d'adventice de la céréale en fonction de la biomasse d'adventice du lupin précédant**

La corrélation liant ces deux variables n'est pas significative. Un point représente une zone d'une parcelle. La zone avec 499 grammes d'adventice par m<sup>2</sup> n'est pas représentée ici. Pour l'histogramme : en jaune : les zones des parcelles de lupin ayant moins de 10g/m<sup>2</sup> d'adventice, en orange : de 10 à 100 et en rouge : plus de 100. Les barres d'erreur représentent l'écart type. Ces graphes ne sont basés que sur l'analyse du premier couple d'années. Pour les données relatives à la céréale seule la zone fertilisée est ici présentée.



**Figure 15 : Biomasse d'adventice du lupin (A) et de la céréale suivante (B) en fonction du mode d'insertion du lupin**

Les barres d'erreur représentent l'écart type. Asso : association lupin-triticale (en rouge), bpur\_h : bande pure des parcelles en association (en vert), pur\_h : parcelles d'hiver en pur (en turquoise), pur\_p : parcelles de lupin de printemps en pur (en violet). Ces graphes ne sont basés que sur l'analyse du premier couple d'années. Pour les données relatives à la céréale seule la zone fertilisée est ici présentée.



**Figure 16 : Biomasse d'adventice de la céréale en fonction du travail du sol**

Le lien entre ces deux variables n'est pas significatif. Jaune : les parcelles non labourées, Rose : les parcelles labourées. Les barres d'erreur représentent l'écart type. Ces graphes ne sont basés que sur l'analyse du premier couple d'années. Pour les données relatives à la céréale, seule la zone fertilisée est ici présentée.

## 6. Discussion et perspectives

### 6.1. Effet précédent Azote

#### 6.1.1. La variabilité de l'effet précédent Azote

##### - L'effet précédent (sens strict)

Les résultats obtenus sur ce réseau permettent de confirmer la forte variabilité de l'effet précédent du lupin en termes de contribution à l'enrichissement en azote du milieu (bilan azoté). Ces variations sont expliquées par les variations du NHI, du %Ndfa et de la quantité d'azote du couvert de lupin, mais c'est le NHI qui explique le mieux les variations du bilan azoté du lupin.

On remarque aussi que la corrélation (négative) entre la quantité d'azote des pailles et le NHI est très forte. Il apparaît aussi que l'indice de récolte azoté et la quantité d'azote du couvert de lupin sont très liés à la biomasse. Il semble donc que la biomasse du couvert de lupin soit un bon indicateur de la quantité d'azote dans les pailles et du bilan azoté du lupin.

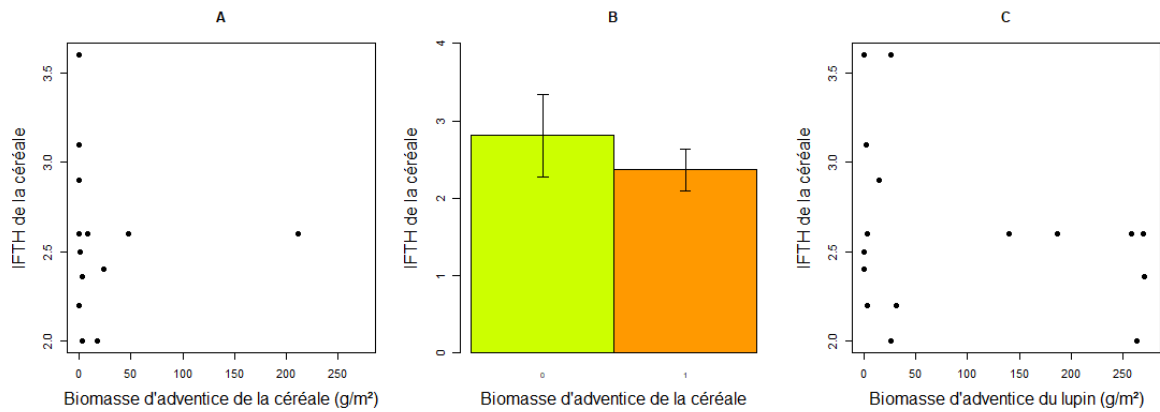
Nos résultats montrent que le NHI ne diffère *a priori* que peu entre les cultures pures et les cultures associées. Un agriculteur déclare que l'association permet d'améliorer l'indice de récolte en augmentant la hauteur de la première gousse de lupin ; cette remarque n'est pas contradictoire avec nos mesures puisque les placettes qui servent à évaluer le NHI sont ici récoltées manuellement. La mesure de NHI ne comprend donc pas les pertes à la récolte. Néanmoins, rien ne permet non plus de confirmer l'observation de cet agriculteur. En revanche, une différence importante est relevée entre le NHI du lupin de printemps et celui du lupin d'hiver. Il en résulte que le lupin de printemps a un potentiel de fourniture d'azote au blé suivant via ses pailles plus faible que le lupin d'hiver. Ce résultat n'est basé que sur une année d'observation et mériterait d'être confirmé sur plusieurs campagnes. Peu d'éléments sont disponibles dans la bibliographie pour discuter ces résultats. On notera tout de même que le lien entre le NHI et la biomasse semble cohérent avec les mesures réalisées par Kaul (2004) qui montrent qualitativement que la quantité d'azote des résidus est plus forte quand le rendement du lupin est plus faible.

Les résultats de reliquats sont globalement surprenants et difficilement explicables. Les reliquats à la récolte du lupin sont globalement élevés. Ils n'ont pu être mis en lien avec aucune autre variable. Une différence est tout de même notable : les parcelles en association ont des reliquats plus faibles que les parcelles conduites en pur. Ce résultat est cohérent avec les références disponibles sur les associations céréales légumineuses qui ont pour effet de réduire les reliquats à la récolte (Vertes *et al.*, 2010) en raison de l'absorption de l'azote du sol par la culture non fixatrice.

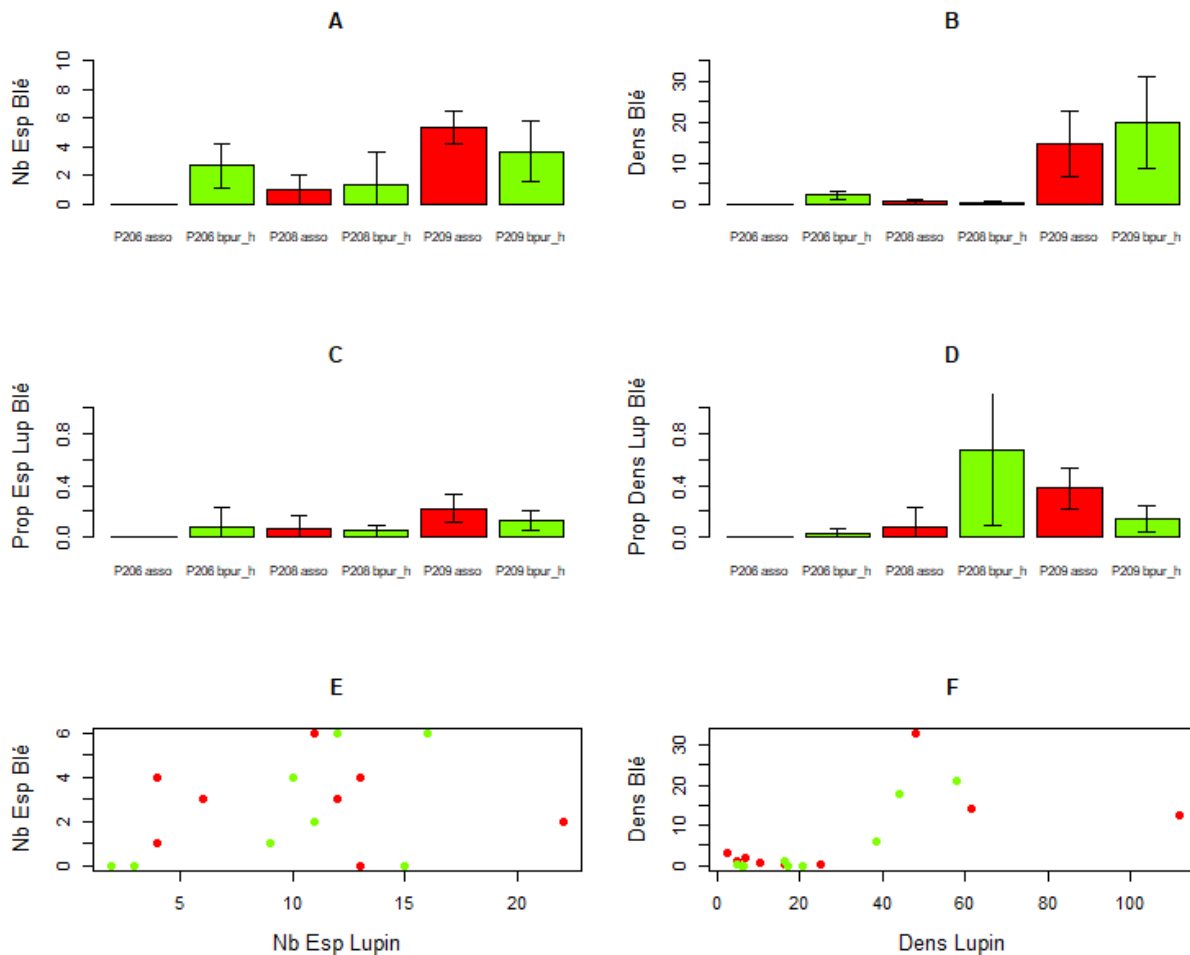
Au semis du suivant les reliquats ont beaucoup évolué, en moyenne ils ont fortement augmenté. L'écart de reliquat entre les associations et les bandes pures s'est réduit. Les reliquats au semis d'une culture d'automne ne semblent pas différer entre les parcelles ayant des précédents lupins et les parcelles ayant des précédents céréales. Il est pourtant communément admis qu'après une légumineuse, les reliquats sont plus élevés qu'après des cultures non fixatrices (Vertes *et al.*, 2010; Voisin et Gastal, 2015). Cela s'explique peut-être par la forte évolution des reliquats entre la récolte du lupin et le semis du blé suivant, qui ne sont pas liés entre eux. Cette absence de corrélation interroge étant donnée la courte période d'interculture. Il semble que la minéralisation des pailles puisse y contribuer. Mais ce point mériterait d'être étudié davantage au travers d'une étude fine de la dynamique des reliquats dans le temps. Il est probable que de multiples facteurs aient interagi et notamment que la minéralisation des différents amendements organiques apportés aux parcelles, influe lourdement sur la dynamique des reliquats.

##### - La sensibilité du suivant

La sensibilité du suivant a ensuite été analysée au travers de l'étude de la quantité d'azote accumulée par le blé. Il apparaît que c'est la fertilisation qui est de loin le principal facteur de variation de la quantité d'azote du couvert de blé et que l'effet du lupin précédent n'est pas perceptible dans les parcelles du réseau conduites de manière conventionnelle. Cela corrobore les observations de Vertès *et al.* (2010) sur le blé dur. Ils rapportent que la fertilisation augmente fortement l'accumulation d'azote dans la céréale, alors que les différents modes d'insertion du pois précédent (pois d'hiver ou de printemps) et la gestion de la période d'interculture (avec ou sans moutarde) semblent jouer à la marge sur la quantité d'azote absorbée par la céréale. Cela est aussi en adéquation avec les observations de Mark Seymour *et al.* (2012) qui montrent que la quantité d'azote apportée diminue l'impact positif du



**Figure 17 : IFT herbicide de la céréale en fonction de la biomasse d'adventice de la céréale (A et B) et du lupin (C)**  
 Le lien entre ces variables n'est pas significatif. Un point représente une parcelle. Pour l'histogramme : le jaune représente les parcelles ayant une biomasse d'adventice dans le blé inférieur à 2g/m<sup>2</sup> et le orange les parcelles avec une biomasse supérieure à 2 g/m<sup>2</sup>. Les barres d'erreur représentent l'écart type. Ces graphes ne sont basés que sur l'analyse du premier couple d'années. Pour les données relatives à la céréale, seule la zone fertilisée est ici représentée.



**Figure 18 : Impact des populations d'adventice du lupin sur celles du blé suivant**  
 A : Nombre d'espèces présentes dans le blé, B : Densité des adventices dans le blé, C : Part des espèces présentes dans le blé aussi présentes dans le lupin précédant, D : Part de la densité des adventices du blé dont l'espèce était aussi présente dans le lupin. E : Nombre d'espèces observées sur le blé en fonction du nombre d'espèces observée sur le lupin. F : Densité d'adventice observée sur le blé en fonction de la densité d'adventice observée sur le lupin. Cette figure ne reprend que les trois parcelles ayant été conduites en association (en rouge) la deuxième année et leur bande pure (en vert). NB : pour la P206 la bande pure est en réalité une autre parcelle proche mais gérée différemment. Aucun test de Wilcoxon comparant les deux modalités n'a de probabilité critique significative. Dens : densité, Esp : espèce, Nb : nombre, Prop : proportion.



lupin et du pois sur le rendement du blé suivant. On remarque tout de même que malgré le fait que plusieurs agriculteurs déclarent réduire la dose d'azote apportée après un lupin sur notre réseau, la quantité d'azote apportée (en moyenne 180 u) est légèrement supérieure à la moyenne des apports en 2014 dans les Pays de la Loire (environ 170 u : 151 u d'azote minéral en moyenne, auxquelles s'ajoutent environ 20 u liées à la fertilisation organique) (AGRESTE, 2017).

L'accumulation d'azote dans les zones non fertilisées est beaucoup plus faible que dans les zones fertilisées. La quantité d'azote du couvert de blé non fertilisé est plus sensible à l'effet précédent du lupin, même si ces effets restent limités et difficilement perceptibles (effets non significatifs). Les reliquats au semis de blé représentent en moyenne deux fois plus d'azote par hectare que les pailles, ils ne ressortent pas comme jouant un rôle déterminant sur la quantité d'azote du couvert de blé. Cela est probablement dû à la complexité des mécanismes jouant sur la dynamique des reliquats évoqués précédemment. Au regard des éléments disponibles, il semble que le principal facteur de l'effet précédent du lupin, qui impacte les performances du blé non fertilisé, soit l'azote des pailles restituées. La quantité d'argile semble être aussi un facteur important. Elle pourrait pénaliser la minéralisation des résidus et de l'humus (Jenkinson, 1977; Harrison-Kirk *et al.*, 2014). Enfin, la quantité de matières organiques du sol joue un rôle plus modeste, mais pourrait participer à la fourniture d'azote via la minéralisation secondaire. Néanmoins, ces trois facteurs, même pris ensemble, n'expliquent qu'une faible part de la variabilité observée de la quantité azotée du couvert. Ces observations sont donc davantage à considérer comme des pistes que comme des résultats définitifs. Ils sont, en effet, basés sur un très petit nombre de points. La dernière année d'étude (en cours) devrait permettre d'affiner ces pistes. On remarque que si ces résultats venaient à se confirmer, ils expliqueraient pourquoi dans ce réseau, les deux agriculteurs qui exportent leurs pailles disent ne pas observer d'effet précédent azoté après un lupin. On note que l'effet de la vitesse de minéralisation des résidus de culture est évoquée par plusieurs auteurs, même s'ils ne font pas référence au taux d'argile du sol (par exemple Kesitalo *et al.*, 2012; Kirkegaard et Ryan, 2014; Kumar et Goh, 2002). Il semble que dans ces études, seule une assez faible part des résidus soit disponible pour la culture suivante (environ 30%)(Jensen, 1994).

En outre, plusieurs auteurs suggèrent que la décomposition des racines peut jouer un rôle important (Jensen, 1994; Voisin et Gastal, 2015) ; mais la complexité de ce type de mesures en plein champ n'a pas permis de les réaliser.

La valeur du différentiel entre la zone fertilisée et non fertilisée semble elle, s'expliquer principalement par le taux d'argile et par la fertilisation azotée. Néanmoins, on remarque que les poids d'Akaike qui servent à déterminer les principaux facteurs de variabilité sont extrêmement sensibles à l'ajout ou la suppression d'un individu (non présenté), ce qui incite à ne pas surestimer la portée de ces résultats.

#### - Les performances du blé

Les rendements du blé sont liés à la quantité d'azote contenu dans son couvert à maturité principalement au travers du nombre de grains par mètre carré. Cette relation est plus forte pour les blés non fertilisés probablement car l'azote est le principal facteur limitant de ces parcelles. Ces résultats semblent cohérents avec les résultats obtenus à l'issue d'autres DAR dans la littérature qui montrent souvent que la composante de rendement la plus variable est le nombre de grains par m<sup>2</sup> (David *et al.*, 2005; Leterme *et al.*, 1994), et que cette variable est impactée en premier lieu par la nutrition azotée en agriculture biologique (David *et al.*, 2005), alors que la nutrition azotée semble peu impactante sur les blés conventionnels (Leterme *et al.*, 1994).

On remarque aussi que le taux de protéines des grains est lié à la quantité d'azote accumulée dans le couvert. Il est notable que malgré leurs précédents lupins aucune des parcelles étudiées n'atteint une teneur en protéines de 10% sans fertilisation. Ces taux de protéines sont très faibles même comparés aux taux de protéines obtenus en agriculture biologique sur les parcelles étudiées par Casagrande *et al.* (2009) dans le sud-est de la France qui étaient en moyenne de 10,8%. Ils notent aussi que la nutrition azotée est un facteur majeur pour expliquer de la teneur en protéines, ce qui est en adéquation avec les résultats de notre réseau.

#### 6.1.2. Perspectives et pratiques

Il semble que l'effet précédent du lupin sur le blé suivant se manifeste principalement via l'azote restitué dans les pailles. Il apparaît donc que les lupins de printemps qui accumulent moins d'azote dans leurs couverts et ont un NHI plus élevé que les lupins d'hiver, sont moins favorables à la



fourniture d'azote au suivant. Néanmoins, le remplacement du lupin de printemps par un lupin d'hiver n'est pas souhaitable dans tous les systèmes. Il permet, en effet, à certains agriculteurs de mieux répartir leur charge de travail sur l'année. Les risques de gel sont aussi évoqués par certains agriculteurs qui en ont fait l'expérience notamment dans le nord-est de la zone couverte par le réseau.

Outre le type de lupin, il semble que la production de biomasse par le lupin soit un bon indicateur de la fourniture d'azote via les pailles. Une forte biomasse favorise donc *a priori* l'effet précédent du lupin. Il faut néanmoins veiller à ce que le lupin ne produise pas une biomasse trop importante car un fort développement pénalise le rendement du lupin (baisse de l'indice de récolte). Cette observation est étayée par les agriculteurs qui semblent globalement préférer les lupins assez peu développés.

Enfin, il ressort de cette étude que la fertilisation masque l'effet précédent du lupin sur l'azote. Une absence totale de fertilisation a un impact sur le rendement et fait surtout fortement diminuer la teneur en protéines des grains de blé, ce qui aurait des conséquences économiques désastreuses pour les agriculteurs. Une adaptation de la dose à la variabilité de l'effet précédent du lupin serait donc pertinente. La biomasse du couvert de lupin peut servir d'indicateur. Néanmoins, étant donnée la complexité des mécanismes en jeux, il semble qu'un ajustement grâce à un OAD basé sur une analyse de l'état de la nutrition azotée du couvert (par télédétection (comme FARMSTAR) ou analyse du jus de base de tige (JUBIL) par exemple) soit à recommander.

## **6.2. Effet précédent adventice**

### **6.2.1. La variabilité de l'effet précédent du lupin sur les adventices**

Pour ce qui est de la biomasse d'adventice de la céréale, seul un très petit nombre de parcelles présente de fortes biomasses d'adventice. De plus, aucune relation claire ne semble émerger entre la biomasse d'adventice du lupin et celle du blé. Cela laisse penser que le salissement après un lupin n'est pas particulièrement problématique. Cette hypothèse est de plus confirmée par le fait que seul une faible part des espèces présentes dans le blé l'était aussi dans le lupin. Nos observations semblent cohérentes avec la bibliographie qui fait état d'effets globalement positifs du lupin sur son suivant (Angus *et al.*, 2015; Jensen *et al.*, 2004; Seymour *et al.*, 2012; Zimmer *et al.*, 2016), sans toujours faire références aux adventices. L'impact du lupin sur le salissement du suivant est cité par Seymour *et al.* (2012) mais dans un cas exceptionnel dû à une très forte présence de ravenelles dans le blé induite par l'échec du contrôle de celle-ci dans le lupin précédent. Il est aussi noté par Albrecht (2005) que le lupin augmente le stock semencier en agriculture biologique.

Outre ces éléments bibliographiques, ce point est considéré comme critique par tous les agriculteurs. Plusieurs facteurs pourraient expliquer le fait que cet effet soit cité par les agriculteurs alors qu'il n'est pas observé sur les parcelles du réseau.

Le climat de la campagne 2014-2015 a été défavorable au développement des adventices dans le lupin d'hiver. Cela a probablement contribué à réduire l'impact de l'effet précédent sur l'enherbement du blé.

La faible biomasse d'adventice et sa variabilité limitée chez le blé s'expliquent probablement aussi par l'efficacité des produits de traitement phytosanitaire. De plus, plusieurs agriculteurs disent ajuster les doses et le nombre de passages d'herbicide après un lupin. La corrélation entre l'IFT et la biomasse d'adventice est en réalité très faible. Néanmoins, il est connu de longue date, que l'efficacité des herbicides interagit avec de nombreux facteurs environnementaux comme le stade des adventices, la température, l'humidité et la luminosité au moment de l'application (par exemple Hammerton, 1967; Coupland, 1987). Ces interactions et les différences de sensibilité des agriculteurs à la présence d'adventices sur leurs parcelles expliquent sans doute l'absence de lien statistique entre l'IFT et la biomasse d'adventice.

Les résultats de cette étude suggèrent donc que les pratiques actuelles permettent de réguler les adventices de manière efficace. Il est notable que les IFTH des parcelles de céréales du réseau s'échelonnent de 2 à 3,6. Ces chiffres semblent très élevés par rapport aux chiffres de référence disponibles sur les pratiques dans les Pays de la Loire où les IFTH moyens en 2011 et 2014 étaient respectivement de 1,3 et 1,6 sur le blé tendre (AGRESTE, 2017).

Le labour, bien que son effet ne soit pas significatif, semble être un facteur de diminution de la biomasse d'adventice d'un blé de lupin.



On notera que l'association permet de réduire la biomasse d'adventice dans le lupin, ce qui est cohérent avec ce qui a été observé sur d'autres associations céréales légumineuses (Corre-Hellou *et al.*, 2011; Eskandari et Ghanbari, 2010). Cet effet n'est pas relevé sur le suivant, ce qui s'explique sans doute par l'absence de lien entre la biomasse d'adventice du lupin et de son suivant. Il est important de garder à l'esprit la très faible puissance statistique des tests réalisés.

Malgré les nombreuses réserves évoquées dans ce rapport, il semble que les deux parcelles de blé ayant un fort enherbement aient des caractéristiques spécifiques. En effet, on remarque que ces parcelles ont à la fois : un fort salissement historique, une biomasse d'adventice élevée dans le lupin et qu'elles sont conduites sans labour. Il ne semble pas que le mode d'insertion du lupin soit primordial. En effet, on observe en deuxième année qu'une parcelle d'association et sa bande pure présentent une forte densité d'adventice, alors que sur le premier couple, les deux parcelles avec de fortes biomasses d'adventice étaient des lupins de printemps.

### **6.2.2. Pistes d'amélioration des pratiques**

Il semble découler de cette observation quelques pistes de pratiques qui permettraient de limiter l'éventuel impact du lupin sur le salissement du blé suivant. Tout, d'abord, il semble judicieux de privilégier des parcelles ayant de faibles stocks semenciers. Cela recoupe les recommandations de Terre-Inovia (2016) pour le lupin lui-même. Ensuite, un labour entre le lupin et le blé pourrait permettre de réduire le salissement. Enfin, en cas de fort enherbement du lupin, la mise en place d'une autre culture moins sensible aux adventices que le blé pourrait permettre de limiter l'usage de produits phytosanitaires. Différentes cultures pures ou associées pourraient être étudiées : le triticales et son fort pouvoir couvrant, le sarrasin et son effet allélopathique, ou le maïs qui peut aisément être biné, sont des espèces intéressantes.

### **6.3. Les autres effets précédents et leur variabilité**

Les autres effets du lupin sur le blé n'ont pas été étudiés ou n'ont montré qu'une trop faible variabilité pour pouvoir être analysé.

Il ressort sur les deux couples d'années, que seule une très faible variabilité est observée entre les différentes parcelles en termes de maladies y compris dans les parcelles suivant une association. Cela laisse penser que tous les lupins même en association avec du triticales permettent de couper le cycle des maladies l'année suivante (comme un lupin pur). Cette observation a aussi été faite par un agriculteur qui pratique les associations depuis plusieurs années. Elle est cohérente avec les résultats de Cotterill et Sivasithamparam (1988a) qui observent qu'une graminée dans une culture de lupin réduit l'impact du piétin échaudage sur le blé suivant. Néanmoins, notre observation est à nuancer car aucune mesure n'a été faite sur des blés ayant des précédentes céréales pour certifier que cette absence de variabilité n'est pas due à des conditions défavorables aux maladies (inoculum, milieu physique et climat). Une étude plus approfondie permettrait de répondre aux interrogations des agriculteurs sur ce point.

Par ailleurs, certains agriculteurs citent l'effet favorable du lupin sur la structure du sol, ce qui irait plutôt dans le sens des éléments présentés en bibliographie (Kirkegaard *et al.*, 2008; Preissel *et al.*, 2015). Il serait intéressant d'étudier l'effet du lupin sur la structure du sol en interaction avec le travail du sol et le salissement du blé suivant. Cela pourrait permettre d'aboutir à des recommandations prenant en compte l'effet de la structure du sol sur le suivant du lupin.

### **6.4. Limites de l'étude et perspectives**

La caractérisation de la sensibilité du blé aux effets précédents azotés du lupin nous amène à nous interroger sur les limites du diagnostic agronomique régional. Cette méthode permet ici de relativiser l'importance de certains effets en condition de production. Néanmoins, il semble que la hiérarchisation des facteurs d'un phénomène fin, comme l'effet précédent sur la nutrition azotée, soit assez difficile à réaliser avec le DAR. En effet, il ne permet pas d'étudier les interactions entre facteurs (Doré *et al.*, 2008) qui sont souvent clefs. Il est aussi difficile d'isoler l'effet précédent des autres effets par cette approche ; cela complexifie fortement l'analyse, mais c'est aussi l'intérêt de cette approche qui permet, de ce fait, de se rapprocher des conditions réelles de production. L'augmentation de la taille du réseau en augmentant le nombre d'années d'études permettrait d'accroître la portée des résultats et faciliterait l'analyse (mais le coût économique des analyses et du suivi sur deux années est élevé). Le



DAR n'en demeure pas moins pertinent pour dresser un diagnostic. Ce diagnostic est ensuite remobilisable pour formuler des hypothèses pertinentes avant de mettre en place des expérimentations toutes choses égales par ailleurs. Le second couple d'années et les résultats des autres observatoires du projet LEGITIMES (en Bourgogne-Franche-Comté et en Occitanie sur d'autres légumineuses) pourront aussi permettre d'affiner les résultats présentés ici.

On remarque aussi que le DAR est basé sur l'analyse de la variabilité d'un réseau (Doré *et al.*, 2008). Sur ce premier couple d'années (et certainement sur le second) seul un très faible nombre de parcelles présentent une forte biomasse d'adventice. Cela rend mécaniquement difficile l'obtention de relations statistiques avec cette variable.

Certaines analyses auraient pu permettre d'affiner le diagnostic, notamment l'analyse de l'INN qui est souvent utilisée pour le diagnostic agronomique régional (par exemple Casagrande *et al.*, 2009; David *et al.*, 2005).

De plus, pour ce qui est des comptages de densité d'adventice réalisés sur le deuxième couple, ils n'ont été réalisés que sur trois parcelles dont deux avec des blés quasi exempts d'adventices. Les populations d'adventice étant très variables dans l'espace (Colbach *et al.*, 2000), il est aussi possible que la surface des trois placettes d'une zone ne soit pas suffisante pour faire le lien entre la structure des communautés des deux années. Il apparaît que l'étude du stock semencier peut être utilisée pour caractériser l'évolution du salissement des parcelles au cours du temps (par exemple Hossain *et al.*, 2017; Teasdale *et al.*, 2004; Albrecht, 2005). Une telle approche présente notamment l'avantage d'isoler l'effet du lupin de l'effet des herbicides. Elle permettrait aussi d'étudier l'impact du travail du sol sur la distribution du stock semencier dans le profil du sol (comme par exemple Rahman *et al.*, 2000) puisque le labour semble jouer un rôle sur la sensibilité du blé à l'effet précédent du lupin sur la biomasse d'adventice. L'étude du stock semencier serait donc très complémentaire à l'étude de la biomasse qui est un indicateur nécessaire pour caractériser la sensibilité du blé à l'effet précédent du lupin sur les adventices dans les systèmes de culture étudiés. Une autre alternative pourrait aussi être d'étudier des parcelles en agriculture biologique, ce qui est fait sur d'autres observatoires du programme LEGITIMES.

De plus, la campagne de blé présentée dans cette étude est une campagne tout à fait atypique puisque, selon les agriculteurs, les rendements ont chuté de manière importante et inégale par rapport aux autres années. Les résultats présentés dans cette étude sont donc faiblement représentatifs et permettent difficilement de tirer des conclusions génériques. Ces aléas météorologiques ont rendu impossible le test de stratégies pour limiter la variabilité non liée aux effets précédents, comme ramener le rendement de la parcelle à un rendement moyen potentiel par exemple. L'année précédente (2014-2015) avait été elle, très favorable au développement du triticales pendant l'hiver (doux), ce qui a eu pour conséquence que l'association a souvent été dominée par le triticales.

## Conclusion

*In fine*, bien que la variabilité de l'effet précédent soit en partie confondue avec des facteurs de variabilité comme le milieu physique, il semble émerger quelques éléments clefs. Ainsi, l'adaptation de la fertilisation est un facteur primordial à la bonne valorisation de l'effet précédent azoté du lupin et le labour semble pouvoir limiter l'impact du salissement du lupin sur le blé suivant. Il pourrait, de ce fait, permettre de réduire les IFTH de blé, très élevés sur ce réseau.

Des expérimentations de plein champ analysant, toutes choses égales par ailleurs, les effets des pratiques proposées dans cette étude, seraient pertinentes. Cela permettrait de confirmer les tendances observées sur la réalité du terrain, par des expérimentations permettant d'isoler efficacement les effets entre eux.





## Références

- AGRESTE (2017). Enquête pratiques culturales blé tendre 2014 *Agreste Pays de la Loire*: 1-2.
- Akaike, H. (1973). Maximum likelihood identification of Gaussian autoregressive moving average models. *Biometrika*: 255-265.
- Albrecht, H. (2005). Development of arable weed seedbanks during the 6 years after the change from conventional to organic farming. *Weed Research* 45(5): 339-350.
- Altieri, M. A. (1999). The ecological role of biodiversity in agroecosystems. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 74(1-3): 19-31.
- Amarger, N., Mariotti, A., Mariotti, F., Durr, J. C., Bourguignon, C., Lagacherie, B. (1979). Estimate of symbiotically fixed nitrogen in field grown soybeans using variations in  $^{15}\text{N}$  Natural abundance. *Plant and Soil* 52(2): 269-280.
- Angus, J. F., Kirkegaard, J. A., Hunt, J. R., Ryan, M. H., Ohlander, L., Peoples, M. B. (2015). Break crops and rotations for wheat. *Crop and Pasture Science* 66(6): 523-552.
- Arvalis (2013). Teneur en protéines des blés : relever le double défi agronomique et économique. [en ligne] disponible sur : [https://www.arvalisinstitutduvegetal.fr/plugins/WMS\\_BO\\_Gallery/page/getElementStream.html?id=23905&prop=file](https://www.arvalisinstitutduvegetal.fr/plugins/WMS_BO_Gallery/page/getElementStream.html?id=23905&prop=file). Consulté le 16.02.2017.
- Association pour une AEI (2014). Lup' Ingrédients : cultures associées et conséquences sur la filière. [en ligne] disponible sur <https://www.youtube.com/watch?v=of381ZrgqpQ>. Consulté le 04.01.2017.
- Bakht, J., Shafi, M., Jan, M. T., Shah, Z. (2009). Influence of crop residue management, cropping system and N fertilizer on soil N and C dynamics and sustainable wheat (*Triticum aestivum* L.) production. *Soil and Tillage Research* 104(2): 233-240.
- Barbottin, A., Lecomte, C., Bouchard, C., Jeuffroy, M.-H. (2005). Nitrogen Remobilization during Grain Filling in Wheat. *Crop Science* 45(3): 1141-1150.
- Bedoussac, L., Justes, E. (2010). The efficiency of a durum wheat-winter pea intercrop to improve yield and wheat grain protein concentration depends on N availability during early growth. *Plant and Soil* 330(1): 19-35.
- Ben Slimane, R. (2010). Effets de la septoriose foliaire sur la sénescence et les flux d'azote pendant le remplissage des grains chez le blé tendre Paris: AgroParisTech.
- Boiffin, J., Caneill, J., Meynard, J.-M., Sebillotte, M. (1981). Élaboration du rendement et fertilisation azotée du blé d'hiver en Champagne crayeuse I. - Protocole et méthode d'étude d'un problème technique régional. *Agronomie* 1(7): 549-558.
- Brisson, N., Gate, P., Gouache, D., Charmet, G., Oury, F.-X., Huard, F. (2010). Why are wheat yields stagnating in Europe? A comprehensive data analysis for France. *Field Crops Research* 119(1): 201-212.
- Burnham, K. P., Andersen, D. R. (2002). *Model Selection and Multimodel Inference*. 2nd édition, New-York : Springer-Verlag.
- Casagrande, M., David, C., Valantin-Morison, M., Makowski, D., Jeuffroy, M.-H. (2009). Factors limiting the grain protein content of organic winter wheat in south-eastern France: a mixed-model approach. *Agronomy for Sustainable Development* 29(4): 565-574.
- Cernay, C. (2016). Identifier des légumineuses à graines productives en Europe par synthèses quantitatives de données à large échelle Paris: AgroParisTech.
- Cheriere, T. (2016). White lupin (*Lupinus albus* L.) yield in Pays de la Loire and its nitrogen provisioning services. In *UR LEVA*, Vol. Master, 73 Angers: Groupe-ESA.
- Colbach, N., Forcella, F., Johnson, G. A. (2000). Spatial and temporal stability of weed populations over five years. *Weed Science* 48(3): 366-377.
- Corre-Hellou, G., Brisson, N., Launay, M., Fustec, J., Crozat, Y. (2007). Effect of root depth penetration on soil nitrogen competitive interactions and dry matter production in pea-barley intercrops given different soil nitrogen supplies. *Field Crops Research* 103(1): 76-85.
- Corre-Hellou, G., Crozat, Y. (2005).  $\text{N}_2$  fixation and N supply in organic pea (*Pisum sativum* L.) cropping systems as affected by weeds and pea weevil (*Sitona lineatus* L.). *European Journal of Agronomy* 22(4): 449-458.



- Corre-Hellou, G., Dibet, A., Hauggaard-Nielsen, H., Crozat, Y., Gooding, M., Ambus, P., Dahlmann, C., von Fragstein, P., Pristeri, A., Monti, M., Jensen, E. S. (2011). The competitive ability of pea-barley intercrops against weeds and the interactions with crop productivity and soil N availability. *Field Crops Research* 122(3): 264-272.
- Corre-Hellou, G., Fustec, J., Crozat, Y. (2006). Interspecific Competition for Soil N and its Interaction with N<sub>2</sub> Fixation, Leaf Expansion and Crop Growth in Pea-Barley Intercrops. *Plant and Soil* 282(1): 195-208.
- Cotterill, P. J., Sivasithamparam, K. (1988a). Importance of the proportion of grassy weeds within legume crops in the perpetuation of *Gaeumannomyces graminis* var. *tritici*. *Plant Pathology* 37(3): 337-343.
- Cotterill, P. J., Sivasithamparam, K. (1988b). Reduction of Take-all Inoculum by Rotation with Lupins, Oats or Field Peas. *Journal of Phytopathology* 121(2): 125-134.
- Coupland, D. (1987). Influence of environmental factors on the performance of sethoxydim against *Elymus repens* (L.). *Weed Research* 27(5): 329-336.
- Cu, S. T. T., Hutson, J., Schuller, K. A. (2005). Mixed culture of wheat (*Triticum aestivum* L.) with white lupin (*Lupinus albus* L.) improves the growth and phosphorus nutrition of the wheat. *Plant and Soil* 272(1): 143-151.
- David, C., Jeuffroy, M.-H., Henning, J., Meynard, J.-M. (2005). Yield variation in organic winter wheat: a diagnostic study in the Southeast of France. *Agronomy for Sustainable Development* 25(2): 213-223.
- Dayoub, E., Naudin, C., Piva, G., Shirliffe, S. J., Fustec, J., Corre-Hellou, G. (2017). Traits affecting early season nitrogen uptake in nine legume species. *Heliyon* 3(2): Article e00244.
- Debaeke, P., Aussenac, T., Fabre, J. L., Hilaire, A., Pujol, B., Thuries, L. (1996). Grain nitrogen content of winter bread wheat (*Triticum aestivum* L.) as related to crop management and to the previous crop. *European Journal of Agronomy* 5(3): 273-286.
- Deswarte, J.-C. (2016). Les Essentiels d'ARVALIS : Comment s'élabore le rendement des céréales à paille ? [en ligne] disponible sur <https://www.arvalis-infos.fr/comment-s-elabore-le-rendement--@/view-16191-arvarticle.html>. Consulté le 13.02.2017.
- Dill-Macky, R., Jones, R. K. (2000). The Effect of Previous Crop Residues and Tillage on Fusarium Head Blight of Wheat. *Plant Disease* 84(1): 71-76.
- Dimmock, J., Gooding, M. (2002). The influence of foliar diseases, and their control by fungicides, on the protein concentration in wheat grain: a review. *The Journal of Agricultural Science* 138(04): 349-366.
- Doré, T., Clermont-Dauphin, C., Crozat, Y., David, C., Jeuffroy, M.-H., Loyce, C., Makowski, D., Malézieux, E., Meynard, J.-M., Valantin-Morison, M. (2008). Methodological Progress in On-Farm Regional Agronomic Diagnosis: A Review. *Agronomy for Sustainable Development* 28: 151-161.
- Doré, T., Jeuffroy, M.-H., De Tourdonnet, S. (2006). La connaissance du fonctionnement du champ cultivé, base de l'évolution des systèmes de culture. In *L'agronomie aujourd'hui*, 43-56 (Eds T. Doré, M. Le Bail, P. Martin, B. Ney and J. Roger-Estarde). Versailles: Quae.
- Doré, T., Sebillotte, M., Meynard, J. M. (1997). A diagnostic method for assessing regional variations in crop yield. *Agricultural Systems* 54(2): 169-188.
- Du Cheyon, P., Lesouder, C., Loreou, J. (2014). Protéines : tenir compte de l'effet variété. [en ligne] disponible sur <https://www.arvalis-infos.fr/proteines-tenir-compte-de-l-effet-variete-@/view-16063-arvarticle.html>. Consulté le 01.03.2017.
- Eskandari, H., Ghanbari, A. (2010). Effect of different planting pattern of wheat (*Triticum aestivum*) and bean (*Vicia faba*) on grain yield, dry matter production and weed biomass. *Notulae Scientia Biologicae* 2(4): 111-115.
- Forcella, F., Benec Arnold, R. L., Sanchez, R., Ghera, C. M. (2000). Modeling seedling emergence. *Field Crops Research* 67(2): 123-139.
- Fox, J., Sanford, W. (2011). *An R Companion to applied regression*. R package version 2.0-10. édition.
- Froidmont, E., Bartiaux-Thill, N. (2004). Suitability of lupin and pea seeds as a substitute for soybean meal in high-producing dairy cow feed. *Animal Research* 53(6): 475-487.



- Gilbert, G. A., Knight, J. D., Vance, C. P., Allan, D. L. (1999). Acid phosphatase activity in phosphorus-deficient white lupin roots. *Plant, Cell & Environment* 22(7): 801-810.
- Glen, D. M., Milsom, N. F., Wiltshire, C. W. (1989). Effects of seed-bed conditions on slug numbers and damage to winter wheat in a clay soil. *Annals of Applied Biology* 115(1): 177-190.
- Hammerton, J. (1967). Environmental Factors and Susceptibility to Herbicides. *Weeds* 15(4): 330-336.
- Harrison-Kirk, T., Beare, M. H., Meenken, E. D., Condon, L. M. (2014). Soil organic matter and texture affect responses to dry/wet cycles: Changes in soil organic matter fractions and relationships with C and N mineralisation. *Soil Biology and Biochemistry* 74: 50-60.
- Haynes, R. J., Martin, R. J., Goh, K. M. (1993). Nitrogen fixation, accumulation of soil nitrogen and nitrogen balance for some field-grown legume crops. *Field Crops Research* 35(2): 85-92.
- Hossain, M., Begum, M., Rahman, M., Hashem, A., Bell, R., Haque, M. (2017). Weed seed bank dynamics in long term trials of conservation agriculture. In *2nd Conference on Conservation Agriculture for Smallholders (CASH-II)*, 41-42 Mymensingh, Bangladesh.
- IPCC (Ed) (2014). *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, NY, USA, 465-466-759-760.
- Jenkinson, D. S. (1977). Studies on the decomposition of plant material in soil. V. the effects of plant cover and soil type on the loss of carbon from <sup>14</sup>C labelled ryegrass decomposing under field conditions. *Journal of Soil Science* 28(3): 424-434.
- Jensen, C. R., Joernsgaard, B., Andersen, M. N., Christiansen, J. L., Mogensen, V. O., Friis, P., Petersen, C. T. (2004). The effect of lupins as compared with peas and oats on the yield of the subsequent winter barley crop. *European Journal of Agronomy* 20(4): 405-418.
- Jensen, E. S. (1994). Availability of nitrogen in <sup>15</sup>N-labelled mature pea residues to subsequent crops in the field. *Soil Biology and Biochemistry* 26(4): 465-472.
- Jeuffroy, M.-H., Biarnes, V., Cohan, J.-P., Corre-Hellou, G., Gastal, F., Jouffret, P., Justes, E., Landé, N., Louarn, G., Plantureux, S. (2015). Performances agronomiques et gestion des légumineuses dans les systèmes de productions végétales. In *Les légumineuses pour des systèmes agricoles durables*, 139-223 (Eds A. Schneider and C. Huyghe). Versailles: Quae.
- Jeuffroy, M.-H., Plezer, E., Magrini, M. B., Corre-Hellou, G., Voisin, A. S., Casagrande, M., Mignolet, C., Boussamart, J. P., Carroue, B., Larribeau, A., Sorin, S., Millon, G., Chesneau, G. (2013). Programme Agrobiosphere édition 2013. , Projet LEGITIMES. ANR, Document scientifique, 1-40.
- Kaul, H. (2004). Pre-crop effects of grain legumes and linseed on soil mineral N and productivity of subsequent winter rape and winter wheat crops. *Bodenkultur Wien and Munchen* 55(3): 95.
- Keskitalo, M., Hakala, K., Huusela-Veistola, E., Jalli, H., Jalli, M., Jauhiainen, L., Känkänen, H. (2012). Diversification of crop production through crop rotations. In *12th Congress of the European Society for Agronomy*, 172-173 (Eds P. Mäkelä and F. L. Stoddard). Helsinki: ESA.
- Kirkegaard, J., Christen, O., Krupinsky, J., Layzell, D. (2008). Break crop benefits in temperate wheat production. *Field Crops Research* 107(3): 185-195.
- Kirkegaard, J. A., Ryan, M. H. (2014). Magnitude and mechanisms of persistent crop sequence effects on wheat. *Field Crops Research* 164: 154-165.
- Kumar, K., Goh, K. M. (2002). Management practices of antecedent leguminous and non-leguminous crop residues in relation to winter wheat yields, nitrogen uptake, soil nitrogen mineralization and simple nitrogen balance. *European Journal of Agronomy* 16(4): 295-308.
- Lelei, J. J., Onwonga, R. N. (2014). White lupin (*Lupinus albus* L. cv. Amiga) increases solubility of Minjingu phosphate rock, phosphorus balances and maize yields in Njoro Kenya. *Sustainable Agriculture Research* 3(3): 37.
- Lemaire, G., Millard, P. (1999). An ecophysiological approach to modelling resource fluxes in competing plants. *Journal of Experimental Botany* 50(330): 15-28.
- Lemerle, D., Verbeek, B., Coombes, N. (1995). Losses in grain yield of winter crops from *Lolium rigidum* competition depend on crop species, cultivar and season. *Weed Research* 35(6): 503-509.
- Leterme, P., Manichon, H., Roger-Estrade, J., Buisson, O. (1994). Analyse intégrée des rendements du blé tendre et de leurs causes de variation dans un réseau de parcelles d'agriculteurs du Thymerais. *Agronomie* 14(6): 341-361.



- Liebman, M., Dyck, E. (1993). Crop Rotation and Intercropping Strategies for Weed Management. *Ecological Applications* 3(1): 92-122.
- López-Bellido, L., Fuentes, M., Castillo, J. E., López-Garrido, F. J. (1998). Effects of tillage, crop rotation and nitrogen fertilization on wheat-grain quality grown under rainfed Mediterranean conditions. *Field Crops Research* 57(3): 265-276.
- Makowski, D., Monod, H. (2011). *Analyse statistique des risques agro-environnementaux*. Paris : Springer-Verlag.
- Mason, M., Madin, R. (1996). Effect of weeds and nitrogen fertiliser on yield and grain protein concentration of wheat. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 36(4): 443-450.
- Mayer, J., Buegger, F., Jensen, E. S., Schloter, M., Heß, J. (2003). Residual nitrogen contribution from grain legumes to succeeding wheat and rape and related microbial process. *Plant and Soil* 255(2): 541-554.
- McDonald, G. (1989). The contribution of nitrogen fertiliser to the nitrogen nutrition of rainfed wheat crops in Australia: a review. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 29(3): 455-481.
- Meynard, J., Messéan, A., Charlier, A., Charrier, F., Fares, M. (2013). Freins et leviers à la diversification des cultures. Etudes au niveau des exploitations agricoles et des filières. Synthèse du rapport d'étude, INRA.
- Morfin, M., Makowski, D. (2010). MMIX : un package R pour combiner des modèles en agronomie *Cah Techn. Inra* 69: 41-49.
- Naudin, C., Corre-Hellou, G., Pineau, S., Crozat, Y., Jeuffroy, M.-H. (2010). The effect of various dynamics of N availability on winter pea–wheat intercrops: Crop growth, N partitioning and symbiotic N<sub>2</sub> fixation. *Field Crops Research* 119(1): 2-11.
- Peoples, M. B., Brockwell, J., Herridge, D. F., Rochester, I. J., Alves, B. J. R., Urquiaga, S., Boddey, R. M., Dakora, F. D., Bhattarai, S., Maskey, S. L., Sampet, C., Rerkasem, B., Khan, D. F., Hauggaard-Nielsen, H., Jensen, E. S. (2009). The contributions of nitrogen-fixing crop legumes to the productivity of agricultural systems. *Symbiosis* 48(1): 1-17.
- Peyraud, J. L., Dourmad, J. Y., Lessire, M., Medale, F., Peyronnet, C. (2015). Conséquences zootechniques de l'introduction des légumineuses françaises dans les systèmes de productions animales. In *Les légumineuses pour des systèmes agricoles durables*, 225-261 (Eds A. Schneider and C. Huyghe). Versailles: Quae.
- Preissel, S., Reckling, M., Schläfke, N., Zander, P. (2015). Magnitude and farm-economic value of grain legume pre-crop benefits in Europe: A review. *Field Crops Research* 175: 64-79.
- R Core Team (2016). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- Rahman, A., James, T., Mellsop, J., Grbavac, N. (2000). Effect of cultivation methods on weed seed distribution and seedling emergence. In *Proceedings of the New Zealand plant protection conference*, 28-33: New Zealand Plant Protection Society.
- Schils, R. L. M., van Groenigen, J. W., Velthof, G. L., Kuikman, P. J. (2008). Nitrous oxide emissions from multiple combined applications of fertiliser and cattle slurry to grassland. *Plant and Soil* 310(1): 89-101.
- Seymour, M., Kirkegaard, J. A., Peoples, M. B., White, P. F., French, R. J. (2012). Break-crop benefits to wheat in Western Australia – insights from over three decades of research. *Crop and Pasture Science* 63(1): 1-16.
- Teasdale, J. R., Mangum, R. W., Radhakrishnan, J., Cavigelli, M. A. (2004). Weed Seedbank Dynamics in Three Organic Farming Crop Rotations. *Agronomy Journal* 96: 1429-1435.
- Terres Inovia (2016). Guide de culture du lupin blanc doux d'hiver et de printemps 2016, [en ligne] disponible sur [http://www.terresinovia.fr/fileadmin/cetiom/kiosque/PDF\\_fiches\\_TK/Terres\\_Inovia\\_guide\\_lupin\\_2016.pdf](http://www.terresinovia.fr/fileadmin/cetiom/kiosque/PDF_fiches_TK/Terres_Inovia_guide_lupin_2016.pdf). Consulté le 14.06.2017.
- Thevenet, G., Mary, B., Wylleman, R. (2002). Stockage du carbone et techniques de travail du sol en milieu tempéré: bilan de 30 années d'expérimentation en grandes cultures. *CR Acad. Agric. Fr* 88: 71-78.
- Vertes, F., Jeuffroy, M.-H., Justes, E., Thiebeau, P., Corson, M. (2010). Connaître et maximiser les bénéfices environnementaux liés à l'azote chez les légumineuses, à l'échelle de la culture, de la rotation et de l'exploitation. *Innovations Agronomiques* 11: 25-44.

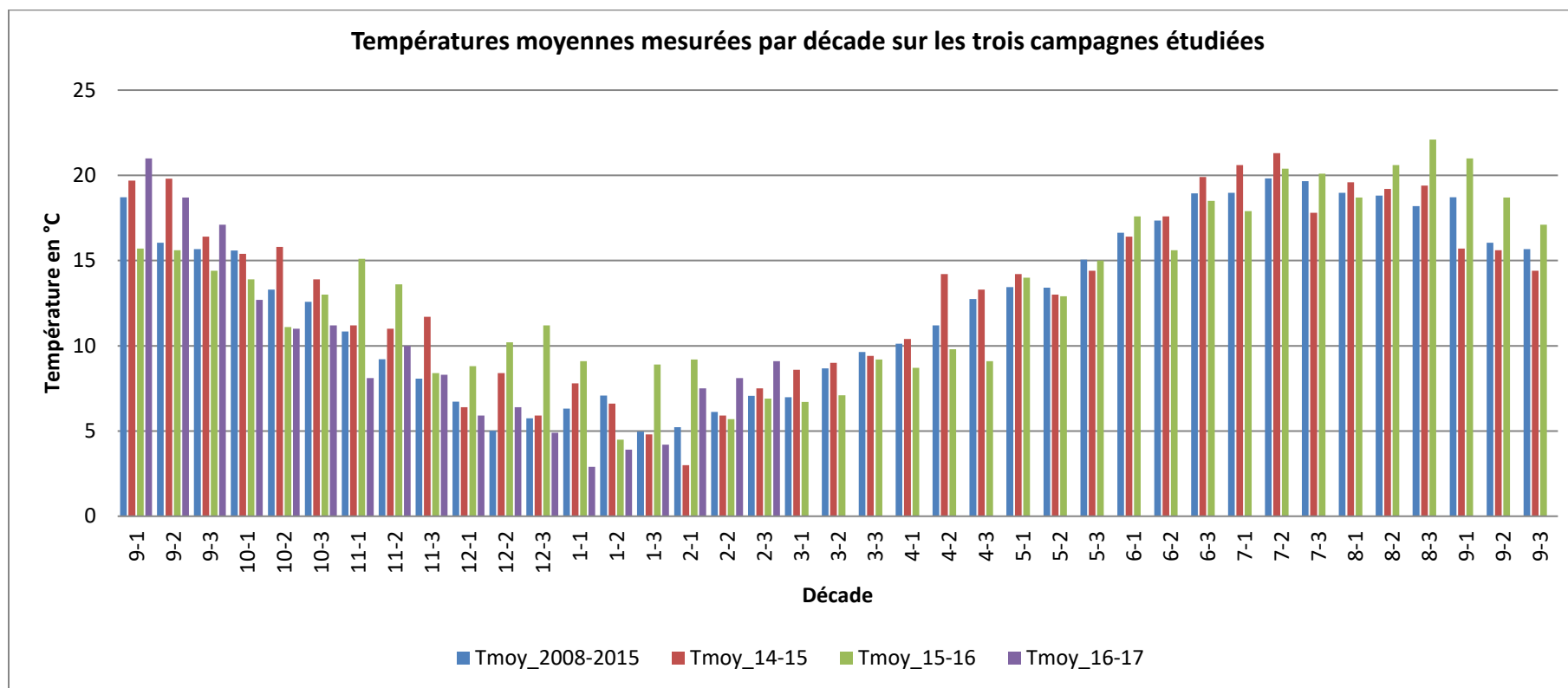




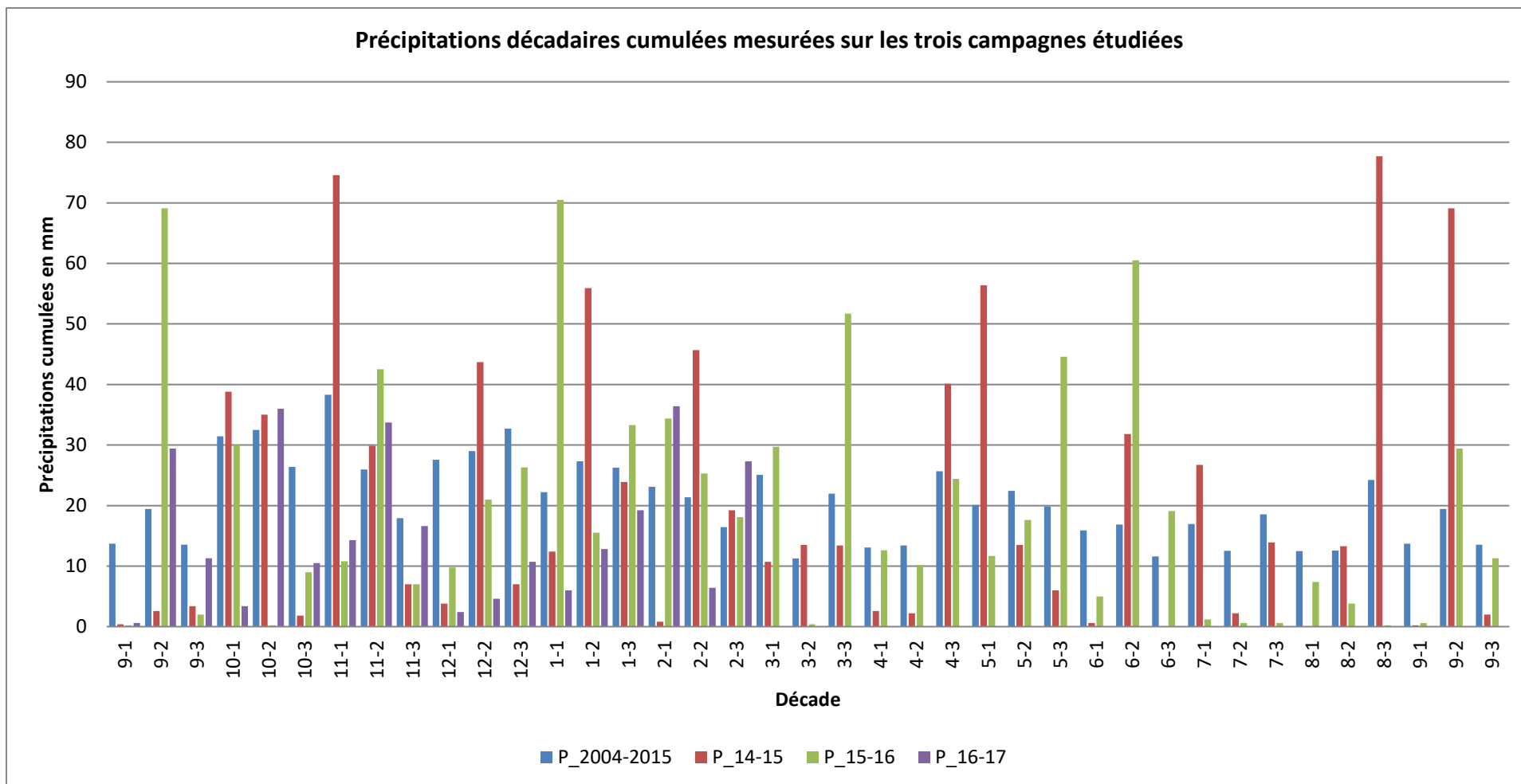
- Vertès, F., Simon, J., Le Corre, L., Decau, M. (1997). Les flux d'azote au pâturage. II-Étude des flux et de leurs effets sur le lessivage. *Fourrages* 151: 263-280.
- Voisin, A.-S., Gastal, F. (2015). Nutrition azotée et fonctionnement agrophysiologique spécifique des légumineuses. In *Les légumineuses pour des systèmes agricoles durables* 79-138 (Eds A. Schneider and C. Huyghe). Versailles Quae.
- 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 and Soil* 243(1): 31-42.
- Zimmer, S., Haase, T., Piepho, H.-P., Stoll, E., Heidt, H., Bohn, T., Heß, J. (2016). Evaluation of grain legume cropping systems for animal fodder potential and impacts on subsequent wheat yield under less favourable soil conditions in organic agriculture in Luxembourg. *Journal für Kulturpflanzen* 68 (6): 164-174.



## Annexe 1 : Les années climatiques (Source : Météo France)



Tmoy\_2008-2015 : la moyenne des températures moyennes décadaires mesurées entre 2008 et 2015 à la station Météo France de Nort-sur-Erdre, Tmoy\_14-15 : la température moyenne décadaire de la campagne 2014-2015 à la station Météo France de Nort-sur-Erdre, Tmoy\_15-16 : la température moyenne décadaire de la campagne 2015-2016 à la station Météo France de Nort-sur-Erdre, Tmoy\_16-17 : la température moyenne décadaire de la campagne 2016-2017 à la station Météo France de Nort-sur-Erdre. L'axe des abscisses représente la décade écrite sous la forme : « numéro du mois »-« numéro de la décade du mois ».

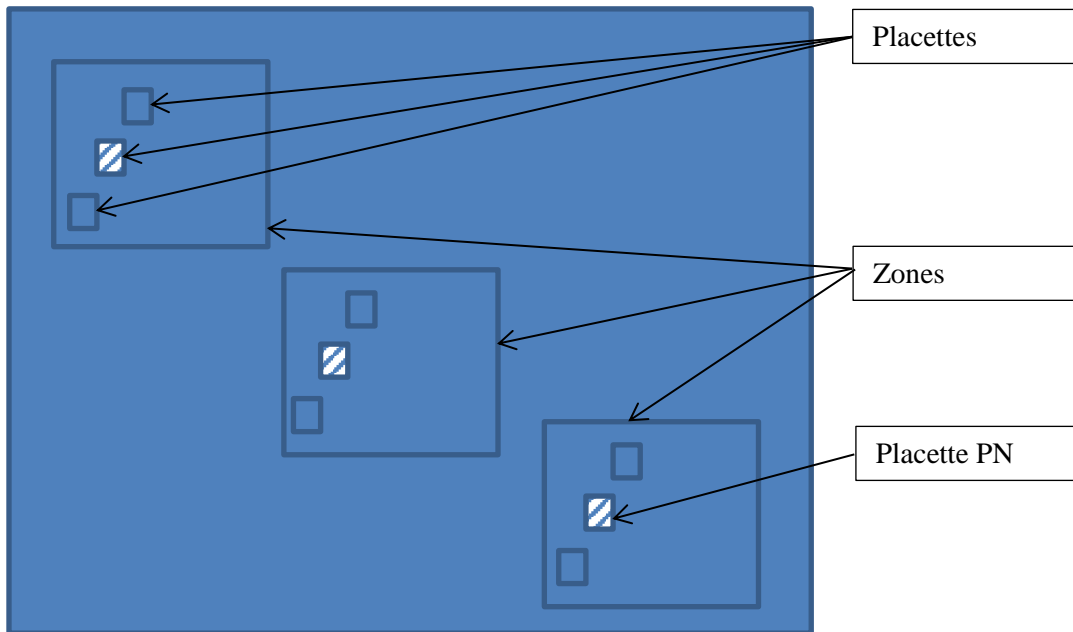


P\_2004-2015 : la moyenne des précipitations cumulées par décade mesurées entre 2004 et 2015 à la station Météo France de Nort-sur-Erdre, Tmoy\_14-15 : les précipitations cumulées décadaires de la campagne 2014-2015 à la station Météo France de Nort-sur-Erdre, Tmoy\_15-16 : les précipitations cumulées décadaires de la campagne 2015-2016 à la station Météo France de Nort-sur-Erdre, Tmoy\_16-17 : les précipitations cumulées décadaires de la campagne 2016-2017 à la station Météo France de Nort-sur-Erdre. L'axe des abscisses représente la décade écrite sous la forme : « numéro du mois »-« numéro de la décade du mois ».

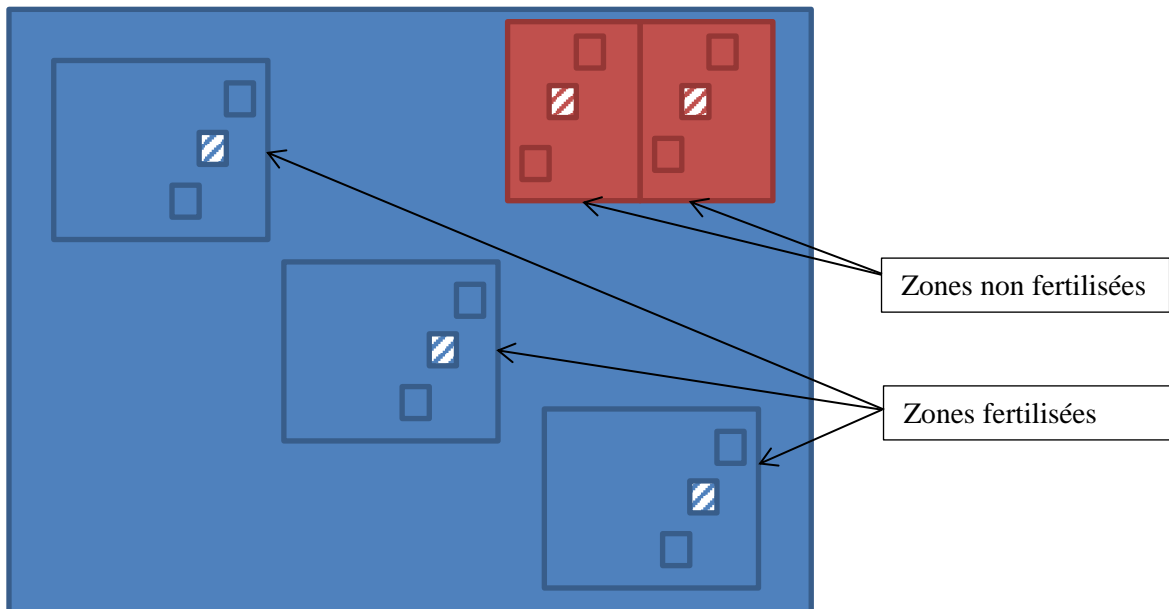
## Annexe 2 : dispositifs dans les parcelles

Organisation type des zones et des placettes de prélèvement sur une parcelle en pur

L'année de la culture de lupin (n):

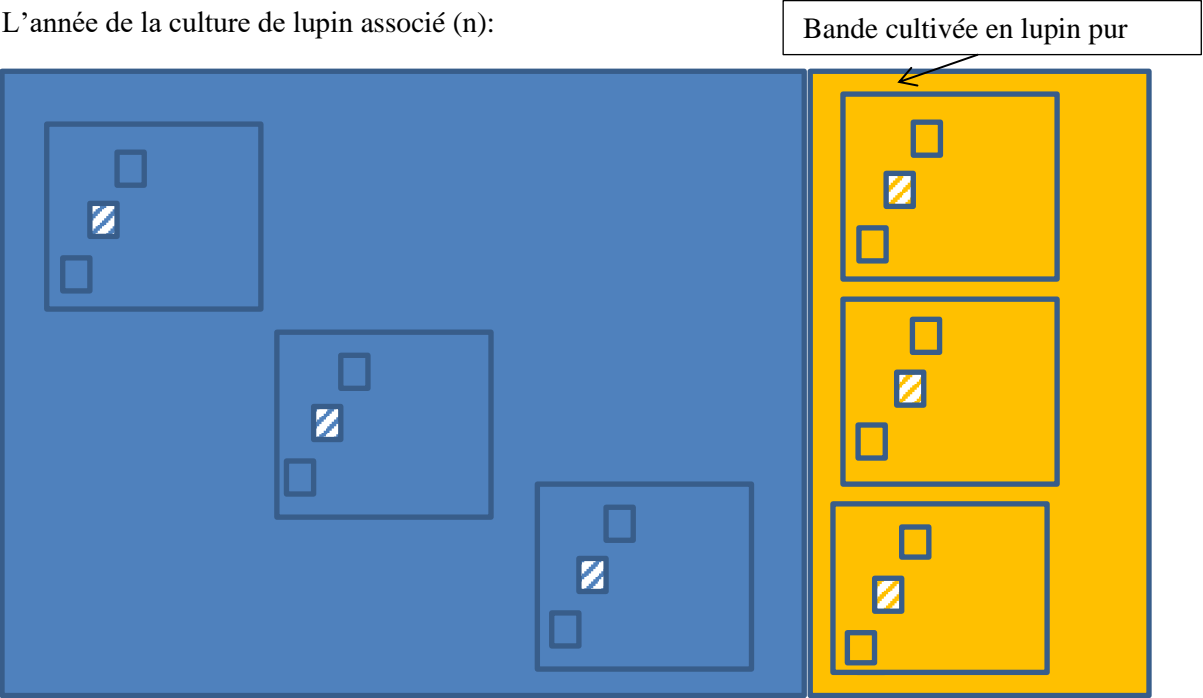


L'année de la culture de céréale (n+1):

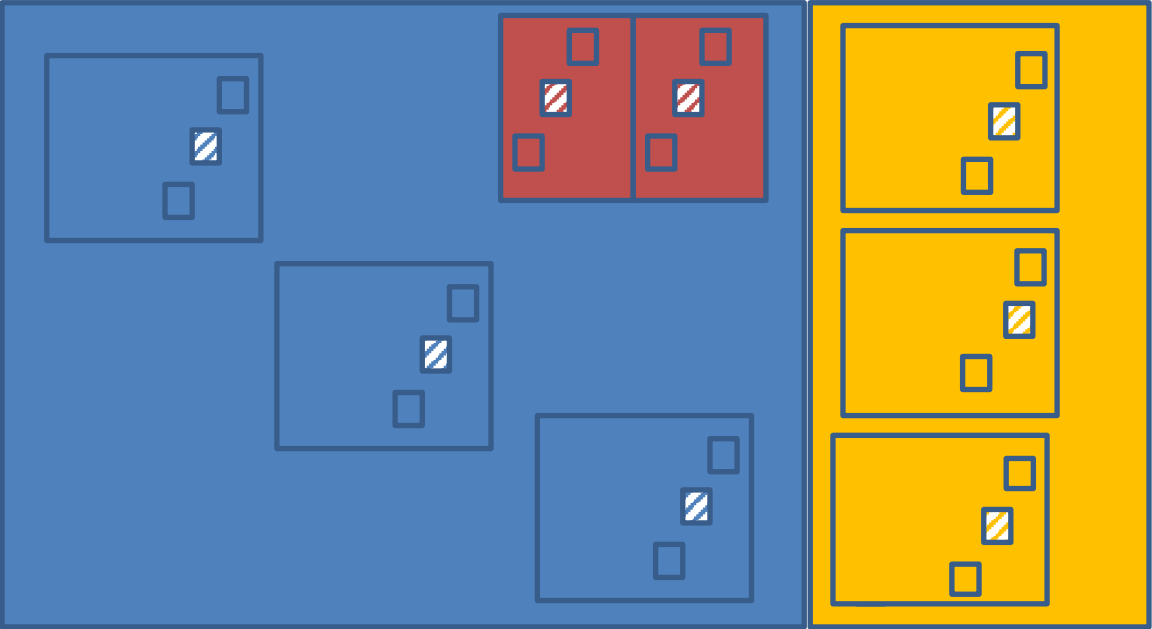


Organisation type des zones et des placettes de prélèvement sur une parcelle en association lupin-triticale

L'année de la culture de lupin associé (n):



L'année de la culture de céréale (n+1):



### Annexe 3 : Récapitulatif des mesures (Source : Martine Mauline) Résumé chronologique des interventions

Stade	Mesure/Notation	Méthode/Calcul	Objectif
Semis	Reliquats azotés	<b>9</b> prélèvements de sol par parcelle (dont 3 dans chaque zone d'observation) réunis par horizon pour l'analyse	Comparaison entre sites État des lieux de l'alimentation azotée
	Granulométrie, pH, taux de MO, C/N	Analyse sur les échantillons de la couche arable (0-30 cm) sur les échantillons prélevés pour analyse des reliquats d'N	Calcul de la réserve utile Conditions pédologiques
Levée	Densité	Comptage <b>2</b> placettes/zone (placettes destinées aux prélèvements pour estimation du rendement)	Qualité d'implantation de la culture Élaboration du rendement Estimation des pertes à la levée
Sortie d'hiver	Reliquats azotés	<b>9</b> prélèvements de sol par parcelle (dont 3 dans chaque zone d'observation) réunis par horizon pour l'analyse	Contribution de la légumineuse au pool d'azote du sol
	Densité	Comptage <b>2</b> placettes/zone	Estimation des pertes hivernales
Stade 3-4 feuilles	Comptage des sitones	Comptage des dommages foliaires. Échelle de Cantot (Cantot et Rolet, 1986)	Caractérisation des stress biotiques pour la légumineuse à un stade critique
Année n Début floraison	Notations autres ravageurs/maladies	Grille de notation des maladies, et attaques de ravageurs (fréquence, degré d'intensité) au champ et sur échantillons prélevés	Caractérisation des stress biotiques pour la légumineuse à un stade critique
	Notations & Biomasse adventices	<b>3</b> placettes/zone Notation des espèces dominantes, appréciation de l'abondance et de la répartition spatiale. Prélèvement des placettes, étuve 48h à 70° C. Pesée poids frais et poids sec	
	Biomasse culture et teneur en N	<b>3</b> placettes/zone Prélèvement de la culture sur les mêmes placettes que la biomasse adventice. Séparer de la culture associée le cas échéant. Étuve 48h à 70° C. Pesée poids frais et poids sec Teneur en N analysée sur le prélèvement d' <b>1</b> placette/zone, poolés en 1 échantillon	Croissance Compétitivité vis-à-vis des adventices Nutrition azotée
	% d'N issu de la fixation symbiotique	<b>1</b> placette/par zone Même mode opératoire. Broyage sur échantillon réduit et mise en microcapsule pour analyse au laboratoire Plante de référence : adventices <b>1</b> placette/zone	Capacité de fixation de l'azote (Méthode de l'abondance naturelle)

Maturité (3 sem. avant la date prévue de récolte)	Anthracnose	Notation de 20 gousses Échelle de notation de 0 à 5	Facteur limitant du rendement	
	Bruches et tordeuses (pois et féverole)	Analyse des grains		
	Botrytis (lupin, pois)	Notation du nombre de gousses atteintes (20 gousses)		
	Notations & Biomasse des adventices	3 placettes « culture » Idem à début de floraison <b>2</b> placettes/zone	Facteur limitant pour la culture suivante	
	Biomasse de la culture et rendement	Battage, pesée en frais, passage à l'étuve 48h à 70° C, pesée Calcul de la productivité (biomasse aérienne / ha) Indice de récolte = poids du grain / biomasse	Productivité de biomasse Rendement	
	Teneur en N des pailles et des grains	<b>1</b> placette/zone, poolées pour analyse À partir de la biomasse et des grains étuvés, réaliser un broyage sur échantillon pour une analyse au laboratoire Teneur en protéines = 6,25 * teneur N grains Quantité protéines / ha = rdt * teneur en protéines	Nutrition azotée Indice de récolte Bilan apparent Productivité en N et en protéines	
Récolte	Perception de l'agriculteur sur les performances et les services de la culture	Questionnaire commun aux 3 régions	Confronter les impressions des agriculteurs à leurs attentes initiales	
	Rendement parcelle	Rendement machine	Productivité de la culture	
	Tenue de tige	Appréciation visuelle : présence/absence	Effet sur le risque de verse	
	Reliquat N <sub>sol</sub>	Idem aux autres reliquats azotés	Arrière effet azoté : contribution de la légumineuse au stock d'azote du sol	
<b>Année n+1</b>	Semis	Reliquats azotés	10 prélèvements par horizon par parcelle (dont 2 dans chaque zone d'observation) réunis par horizon pour l'analyse. (0-30, 30-60, 60-90 cm) – sur bande 0N – sur zone fertilisée – sur bande « précédent » et/ou « association » le cas échéant	Pertes en N pendant l'interculture Comparaison entre sites État des lieux de l'alimentation azotée Fourniture d'N à la culture suivante



Levée	Densité	Comptage <b>3</b> placettes/zone (placettes destinées aux prélèvements pour estimation du rendement) <b>3</b> placette/zone sur bande 0N (idem sur bande « précédent » et/ou « association » le cas échéant)	Qualité d'implantation de la culture Élaboration du rendement Estimation des pertes à la levée
Sortie d'hiver	Reliquats azotés	Idem	
Floraison	Notations maladies	Piétin-verse rhizoctone, septoriose, rouille brune, rouille jaune, oïdium (Grilles Arvalis)	Effet de la légumineuse sur les bioagresseurs de la culture suivante
	Notation pucerons	(Grilles Arvalis)	
Grain pâteux	Notation spécifique si cas de fusariose déclarée	(Grilles Arvalis)	
	Notation pucerons	(Grilles Arvalis)	
Récolte	Biomasse adventices	<b>2</b> placettes « culture » Idem à année n	Effet de l'introduction de la légumineuse sur la pression en adventices de la culture suivante
	Rendement et teneur en N des grains	<b>2</b> placettes/zone « normale » (Biomasse et rendement) <b>1</b> placette/zone « normale » (teneur en N) <b>1</b> placette/zone sur bande 0N (idem sur bande « précédent » et/ou « association » le cas échéant)	Réponse de la culture suivante à l'introduction de la légumineuse Comparaison de l'arrière effet légumineuse comparé à un autre précédent
	Perception de l'agriculteur sur les performances et les services de la culture	Questionnaire commun aux 3 régions	Confronter les impressions des agriculteurs à leurs attentes initiales

**Annexe 4 : Questionnaire d'enquête sur les pratiques des agriculteurs sur le  
lupin et le blé suivant (Source : Martine Mauline)**

# Questionnaire Guide d'enquête Blé

Bonjour, merci de me recevoir.

Cet entretien s'inscrit dans le cadre du suivi des parcelles du réseau dont votre parcelle fait partie. Il vise à recueillir des informations sur la conduite technique de la culture et des cultures précédentes.

M'autorisez-vous à vous enregistrer sachant que l'enregistrement sera strictement confidentiel et sera détruit à la fin du projet de recherche ?

**NB : Il s'agit d'entretiens semi-directifs**

- 1) *Ce guide est un « canevas », il ne s'agit pas de suivre les questions par ordre chronologique mais donne une idée des différents éléments*
- 2) *Chaque enquête devra être saisie sous version informatique en partant de ce guide*
- 3) *Des redondances entre les parties : volontaire pour organiser les données et faciliter leur traitement*

## AGRICULTEUR / EXPLOITATION

Nom, Prénom :

Date de rendez-vous :

Heure :

Adresse :

Tel/fax :

Commune :

Département :

Identifiant parcelle :

Surface parcelle :

Exploitation:  Biologique  Conventioneel  En conversion  autre :  
.....

Système d'exploitation:  Grandes cultures  Polyculture élevage  élevage  
prépondérant

## Historique culturel de : P..... (pour vérification rapide des infos)

Comment estimez-vous le potentiel de la parcelle par rapport à vos autres parcelles ? :  Bon  Moyen

Faible

Combien de fois y a-t-il eu du lupin sur cette parcelle ?  0  1  2  3  4  plus: ...

Quel était le rendement de cette parcelle pour le lupin blanc ? ..... qx/ha

Etait-ce une :  Bonne année  Année moyenne  Mauvaise année

*Si applicable*: rendement de cette parcelle pour le triticale ? .....qx/ha

Rendement de la bande en lupin pur ? .....qx/ha

Année Irrigation	Culture/Interculture (la + récente en haut)	Dose totale de N apportée	Rendement (q/ha, t/ha,...)	Accidents de culture*
N-1  Oui - Non	InterC			..... ..... ..... .....
	Cult			..... ..... ..... .....
N-2  Oui - Non	InterC			..... ..... ..... .....
	Cult			..... ..... ..... .....
N-3  Oui - Non	InterC			..... ..... ..... .....
	Cult			..... ..... ..... .....
N-4  Oui - Non	InterC			..... ..... ..... .....
	Cult			..... ..... ..... .....
N-5  Oui - Non	InterC			..... ..... ..... .....
	Cult			..... ..... ..... .....

## Itinéraire technique de l'année N+1 Blé ou Orge

### Travail du sol

Objet	Date	Outils	Nb passages	Profondeur	Condition de sol
Déchaumage					Sec - Ressuyé - Humide
					Sec - Ressuyé - Humide
					Sec - Ressuyé - Humide
Travaux profonds (décompactage, labour...)					Sec - Ressuyé - Humide
					Sec - Ressuyé - Humide
					Sec - Ressuyé - Humide
Préparation du lit de semence					Sec - Ressuyé - Humide
					Sec - Ressuyé - Humide
					Sec - Ressuyé - Humide

Gestion résidus de lupin :  En surface  répartis dans le profil  En fond de raie

Semoir :  Combiné  Semis direct  TCS

### Semis

Espèce et Variété*	Date	Dose (kg/ha) ou (grain/m²)	Profondeur (cm)	Écartement (cm)	Levée	Condition du sol
					Lente - Rapide Régulière - Irrégulière	Sec Ressuyé Humide

\* Mettre les proportions en cas de mélange

**Drainage** : Oui- Non **Irrigation** : Oui - Non

Date	Dose (mm)

**Remarques** (accidents semis, difficultés préparation sol...):

.....  
 .....

La parcelle est-elle drainée ? Oui - Non

**Fertilisation de la parcelle** \* (kg ou L/ha)

Produit	Date	Dose (kg/ha)	Quantité N, P, K (%,...)	Conditions d'application	Remarques

**Traitements phytosanitaires** \* (kg ou L/ha)

Fonction Herbi/fongi/insect	Produit(s)	Date	Dose (kg ou L/ha)	Conditions d'application	Degré de réussite
					Bon - moyen - faible
					Bon - moyen - faible
					Bon - moyen - faible
					Bon - moyen - faible
					Bon - moyen - faible
					Bon - moyen - faible
					Bon - moyen - faible

État de salissement de la culture (*entourer*) : important - moyen - faible

### Désherbage mécanique

Outil	Date	Conditions de réalisation	Degré de réussite	Remarques
			Bon - moyen - faible	
			Bon - moyen - faible	
			Bon - moyen - faible	
			Bon - moyen - faible	

### Observations de l'agriculteur sur les caractéristiques climatiques de la campagne :

	Automne	Hiver	Printemps	Été
Pluies (Excès, normal, faible)				
Températures (Froides, moyennes, chaudes)				
Accidents climatiques (Grêle, gel, hydromorphie)				
Accident sur la culture				

### Prévision de récolte

Date	Espèce	Rendement (T/ha)	Taux protéique	Remarques

## **Perception de l'année N+1 et connaissances de l'effet précédent**

**Quels ont été selon vous les conséquences positives ou négligées du lupin blanc (ou de l'association lupin/triticales) sur le blé ?** (par rapport à un blé de blé par exemple) (enherbement, rendement, qualité...)

*Est-ce que vous recommanderiez la culture du lupin blanc à un autre agriculteur ? Pourquoi ?*

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

**Quelles différences existe-t-il entre votre ITK blé de lupin et l'ITK blé de blé ?** (ou blé de non-légumineuse) **Pourquoi ces changements d'ITK ? Ou bien pourquoi pas de changements ?**

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

**Quel a été l'impact** (est l'impact attendu) **de l'introduction du lupin dans votre/vos rotation(s) ?** (économique, organisation du travail, ...):

.....  
.....  
.....



	Valorisation			Marge brute	Coûts de production	
	Contrat Terrena (€/t)	Autoconsommation Estimation économies d'aliment ? (€/t)	Autre circuit (circuit principal, €/t)		Poste	Montant (€/ha, +/- 10€)
Lupin					Fertilisants	
					Herbi/fongi/insecti	
					Mécanisation	
					Main d'œuvre	
					Semences	
Asso Lupin/ Triticale					Fertilisants	
					Herbi/fongi/insecti	
					Mécanisation	
					Main d'œuvre	
					Semences	
Blé de Lupin					Fertilisants	
					Herbi/fongi/insecti	
					Mécanisation	
					Main d'œuvre	
					Semences	
Blé de blé					Fertilisants	
					Herbi/fongi/insecti	
					Mécanisation	
					Main d'œuvre	
					Semences	

\*Si pas d'idée du coup par poste, chercher à l'établir en demandant la conso/h + h/ha pour chaque opération décrite dans l'ITK.

Coûts de tri à ajouter aux charges ou pris en compte dans le paiement par Terrena ? Oui – Non

**Spécificités/remarques** (prestations de services, locations de matériel spécifique...) :

.....  
.....

**Est-ce que l'effet précédent (influence du lupin sur le blé suivant) a été un critère pour le choix de cette culture ?**

**Quel(s) bénéfice(s) attendiez-vous le plus ?**

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

**Quels sont vos attentes/besoins en termes de conseil/suivi technique et recherche et développement sur le lupin ? En termes de connaissances de l'effet précédent ?**

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

## **Annexe 5 : Questionnaire de diagnostic individuel des parcelles**

# Questionnaire Guide d'enquête Diagnostic

Bonjour, merci de me recevoir.

Cet entretien s'inscrit dans le cadre du suivi des parcelles du réseau dont votre parcelle fait partie. Il vise à échanger autour des résultats et des données obtenus sur votre parcelle au cours des deux années de notre suivi. Le but est d'établir ou de confirmer des hypothèses sur les causes des performances de vos deux cultures. (durée : 40 min à 2h30)

M'autorisez-vous à vous enregistrer sachant que l'enregistrement sera strictement confidentiel et sera détruit à la fin du projet de recherche ?

**NB : Ne pas oublier de prendre :**

→ la fiche de synthèse des données de la parcelle

→ Les deux questionnaires sur les ITK déjà réalisés sur le lupin et sur le blé

*Il s'agit d'un entretien semi-directif*

## AGRICULTEUR / EXPLOITATION (à remplir au bureau avant l'entretien)

Nom, Prénom :

Date de rendez-vous :

Heure :

Adresse :

Tel/fax :

Commune :

Département :

Identifiant parcelle :

Surface parcelle :

Exploitation:  Biologique  Conventionnel  En conversion  autre :  
.....

Système d'exploitation:  Grandes cultures  Polyculture élevage  élevage  
prépondérant

## Diagnostic de l'agriculteur sur le lupin

### Quels étaient vos objectifs et vos attentes par rapport à cette culture ?

Quels objectifs de rendements ? Quelles utilisations ? Quels autres objectifs ? Si en association pourquoi ?

Pourquoi lupin d'hiver /de printemps ?

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

### Le résultat que vous avez obtenu sur cette culture de lupin a-t-il été à la hauteur de vos attentes? Quels facteurs expliquent selon vous ce résultat ?

Quels ont été les principaux problèmes que vous avez rencontrés? Comment les hiérarchiserez-vous? Pourquoi cela a eu cet impact selon vous ? Avez-vous des idées de pratiques pour limiter ces problèmes ? (si lupin associé : creuser la différence de résultat entre la bande en pur et la bande en association) Pouvez-vous resituer les performances de cette parcelle de lupin par rapport à vos autres parcelles de lupin si vous en avez? Pouvez-vous resituer cette campagne de lupin par rapport aux autres?

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

## Diagnostic de l'agriculteur sur le blé/orge

**Quels étaient vos objectifs et vos attentes par rapport à cette culture ?**

Quels objectifs de rendements? Quelles utilisations? Quels autres objectifs ?

.....  
 .....  
 .....

**Le résultat que vous avez obtenu sur cette culture de blé a-t-il été à la hauteur de vos attentes? Quels facteurs expliquent selon vous ce résultat ?**

Quels ont été les principaux problèmes que vous avez rencontrés? Comment les hiérarchiseriez-vous? Pourquoi cela a eu cet impact selon vous ? Avez-vous des idées de pratiques pour limiter ces problèmes ? Pouvez-vous resituer cette campagne de blé par rapport aux autres?

.....  
 .....  
 .....  
 .....  
 .....

**Quel a été l'impact du lupin sur le résultat du blé ? Pour quelles raisons ?**

Pouvez-vous resituer les performances de cette parcelle de blé/orge par rapport à vos autres parcelles de blé/orge et notamment celles qui ont d'autres précédents?

.....  
 .....  
 .....  
 .....

**Si une bande non fertilisée a (vraiment) été réalisée :**

**Quel a été le comportement de la bande non fertilisée par rapport au reste de la culture ? Qu'en pensez-vous ?**

.....  
 .....  
 .....

## Présentation des données du lupin et son positionnement par rapport au reste du réseau

### Présenter les documents

Quand vous voyez ces chiffres, est-ce que quelque chose vous surprend ?

.....

.....

.....

.....

Ces analyses vous donnent-elles d'autres pistes d'explications des performances de votre lupin ?

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

## **Présentation des données de l'effet précédent du Lupin sur la céréale et de son positionnement par rapport au reste du réseau**

### **Présenter les documents**

Quand vous voyez ces chiffres, est-ce que quelque chose vous surprend ?

.....

.....

.....

.....

Ces analyses vous donnent-elles d'autres pistes d'explications des performances de votre blé ?

.....

.....

.....

.....

Pensez qu'il faut modifier l'itinéraire technique d'un blé de lupin par apport à un autre blé?

**Pourquoi ?**

Quels facteurs prendriez-vous (ou non) en compte pour choisir comment adapter vos pratiques ?

.....

.....

.....

.....

.....

**Si ces deux années étaient à refaire, que changeriez-vous dans vos pratiques?**

Pourquoi? Pourquoi pas? Quelles pistes d'améliorations ? Quelles erreurs ? Allez-vous continuer à produire du lupin ? Pourquoi ? Quels besoins techniques ?





Recueil de données

Diagnostic croisé

Date : 05/07/2017

MàJ : 05/07/2017

page 87/100

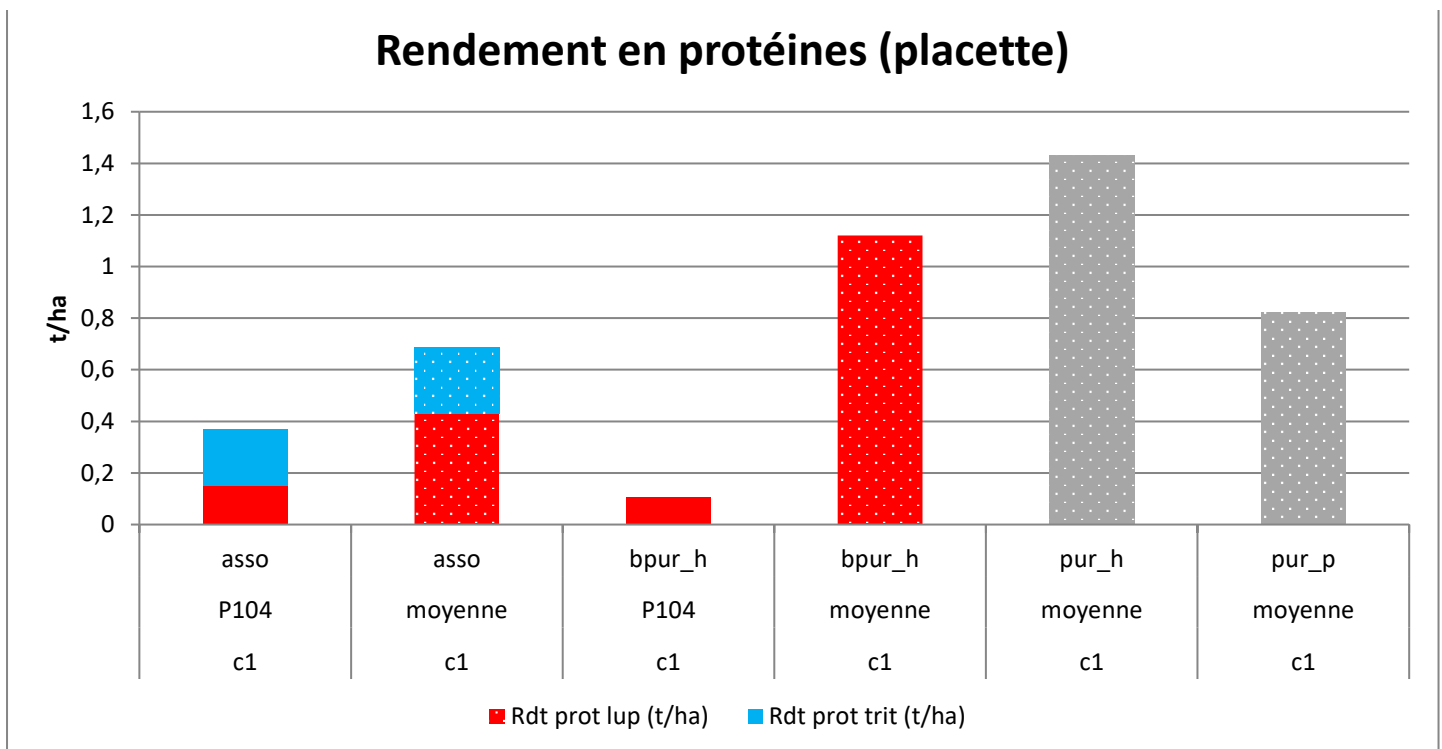
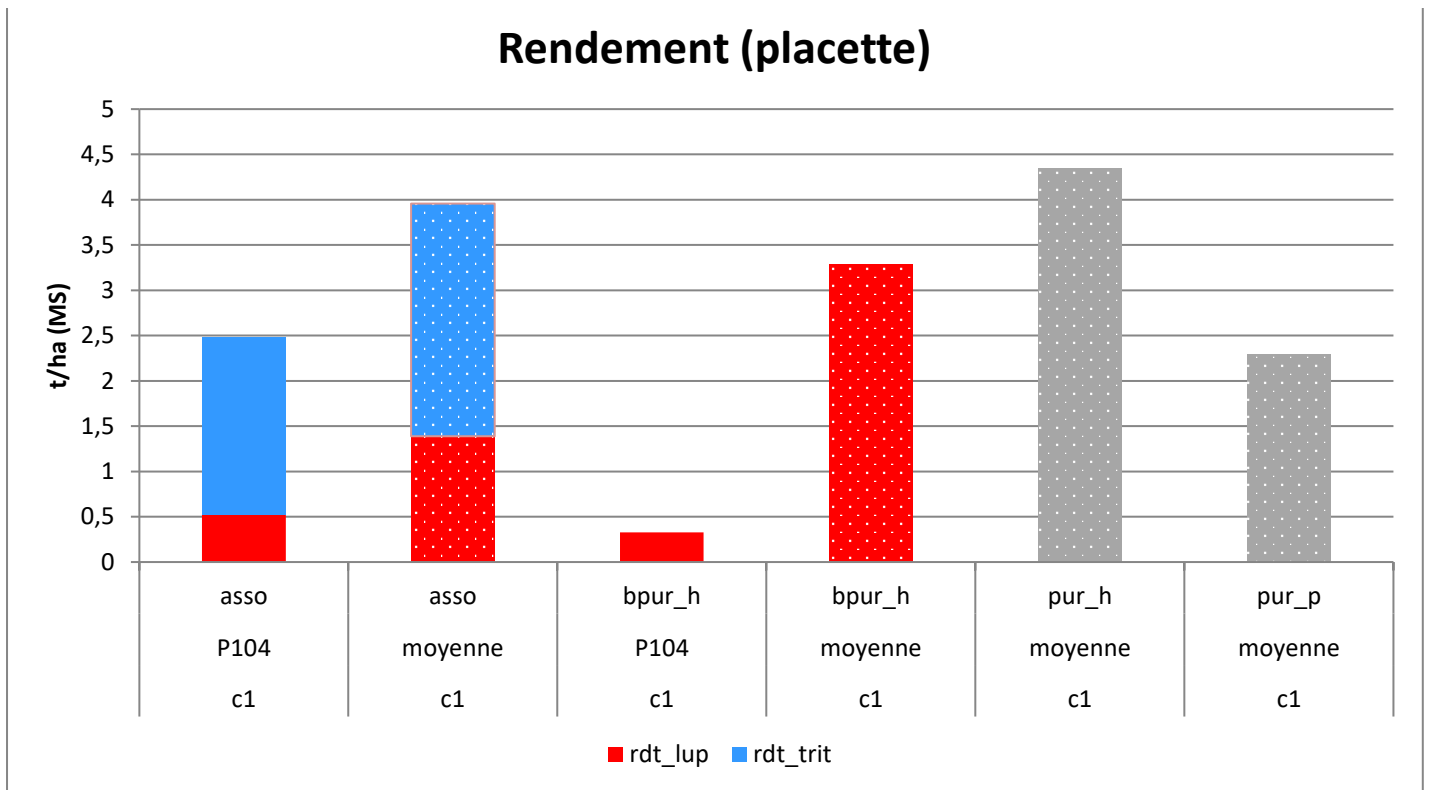
.....

.....

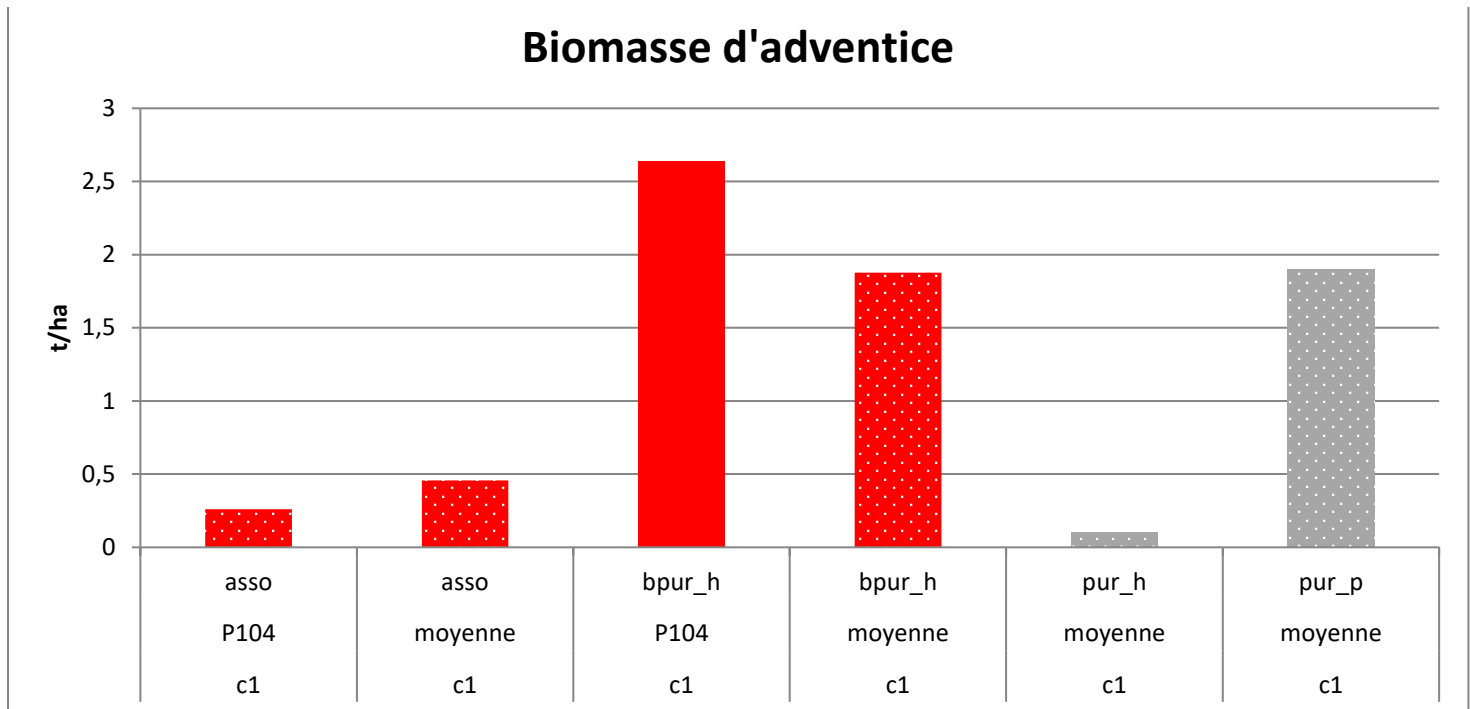
.....

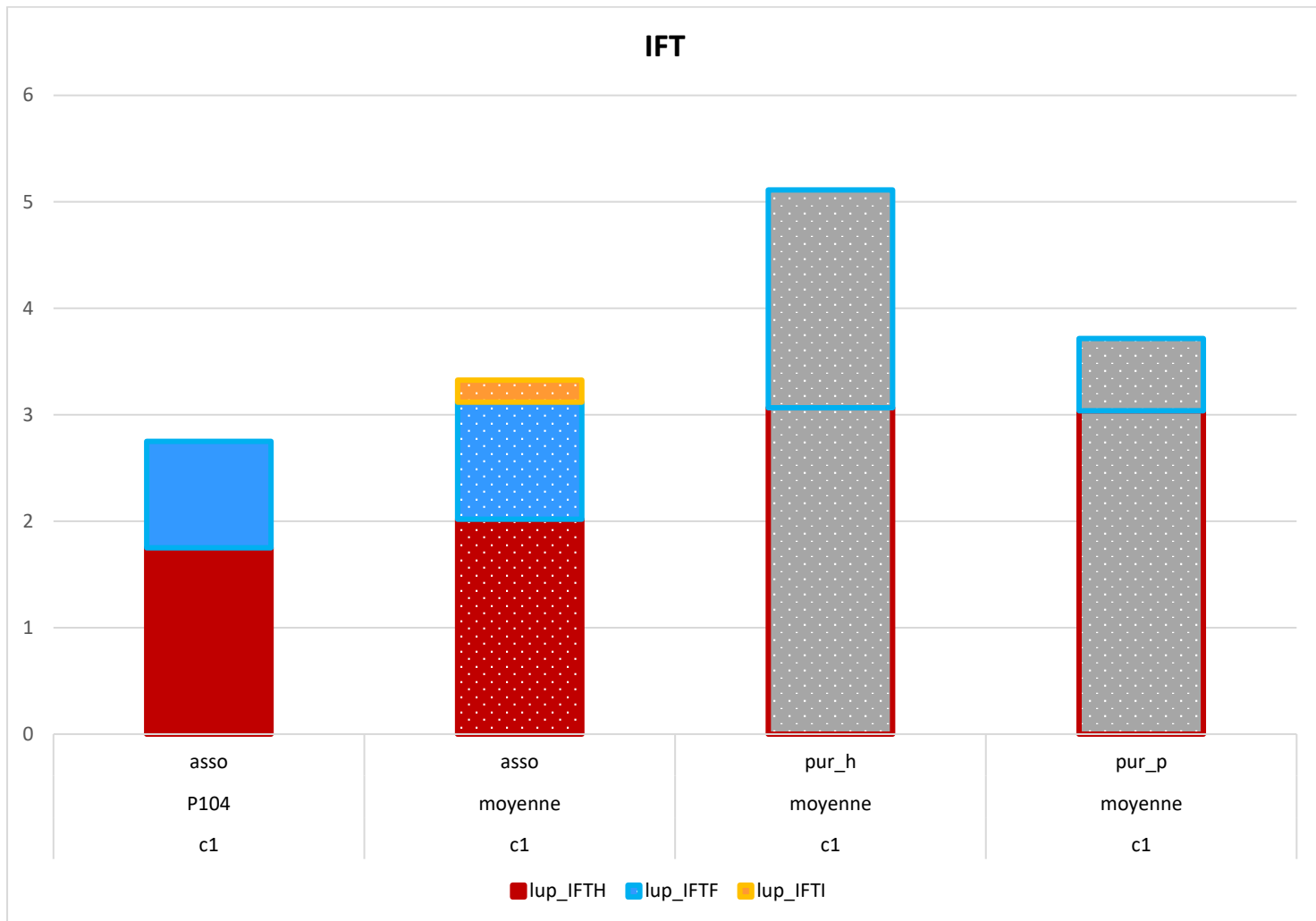


## Rendement du lupin/de l'association

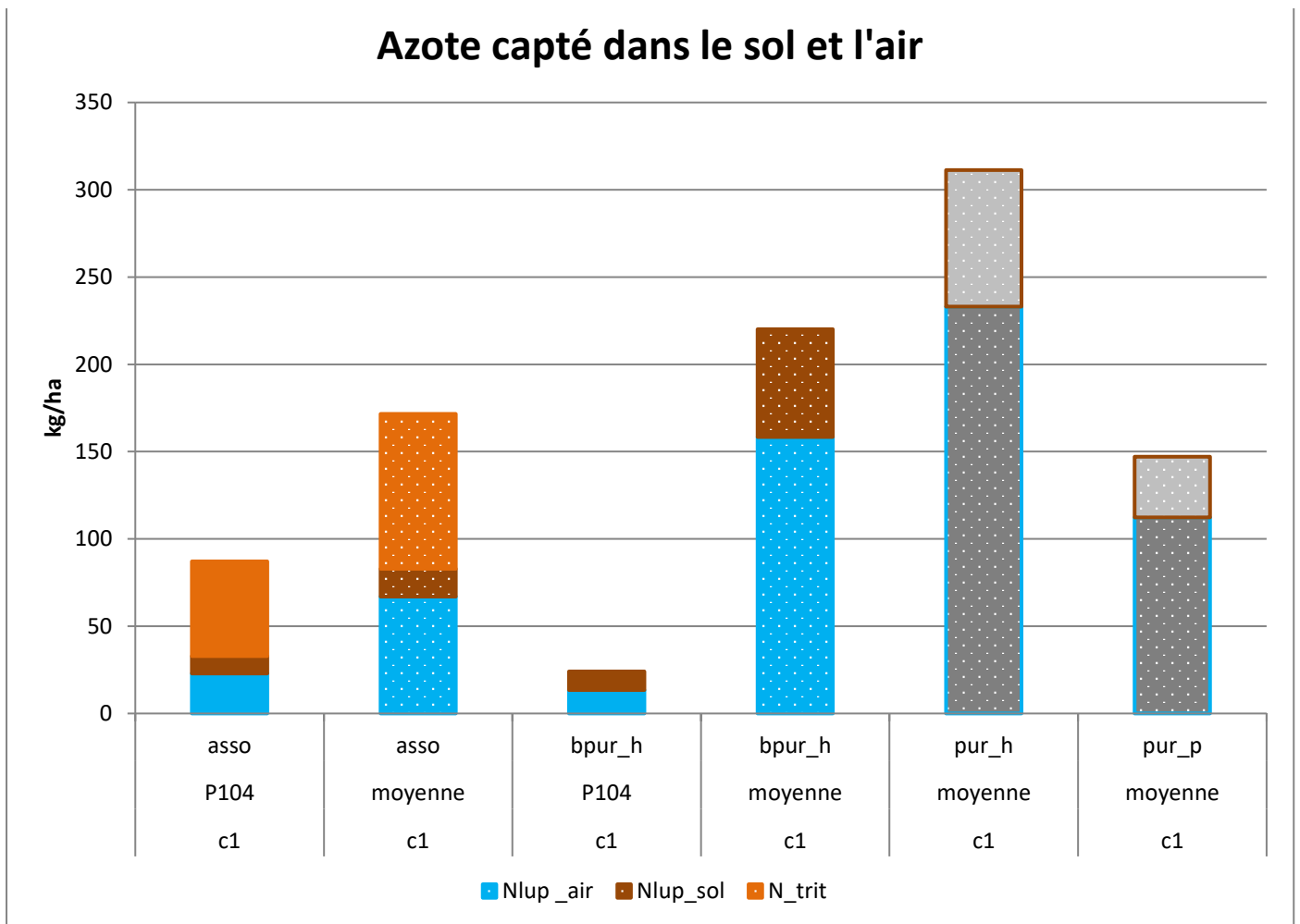


## Adventices du lupin/de l'association

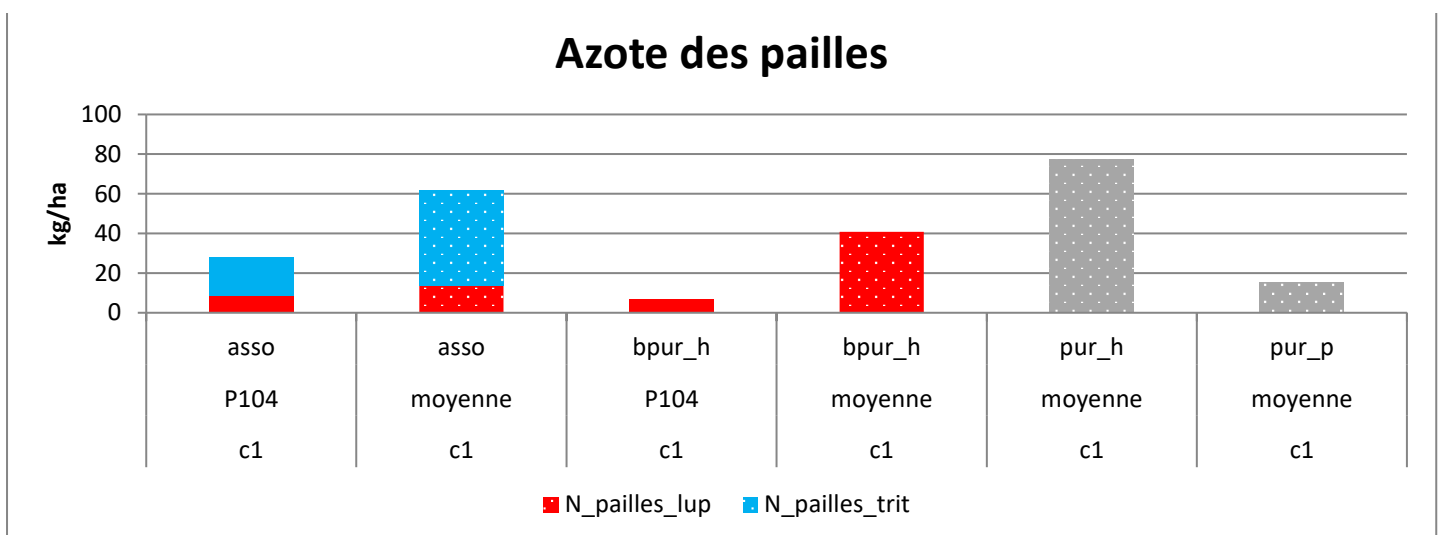
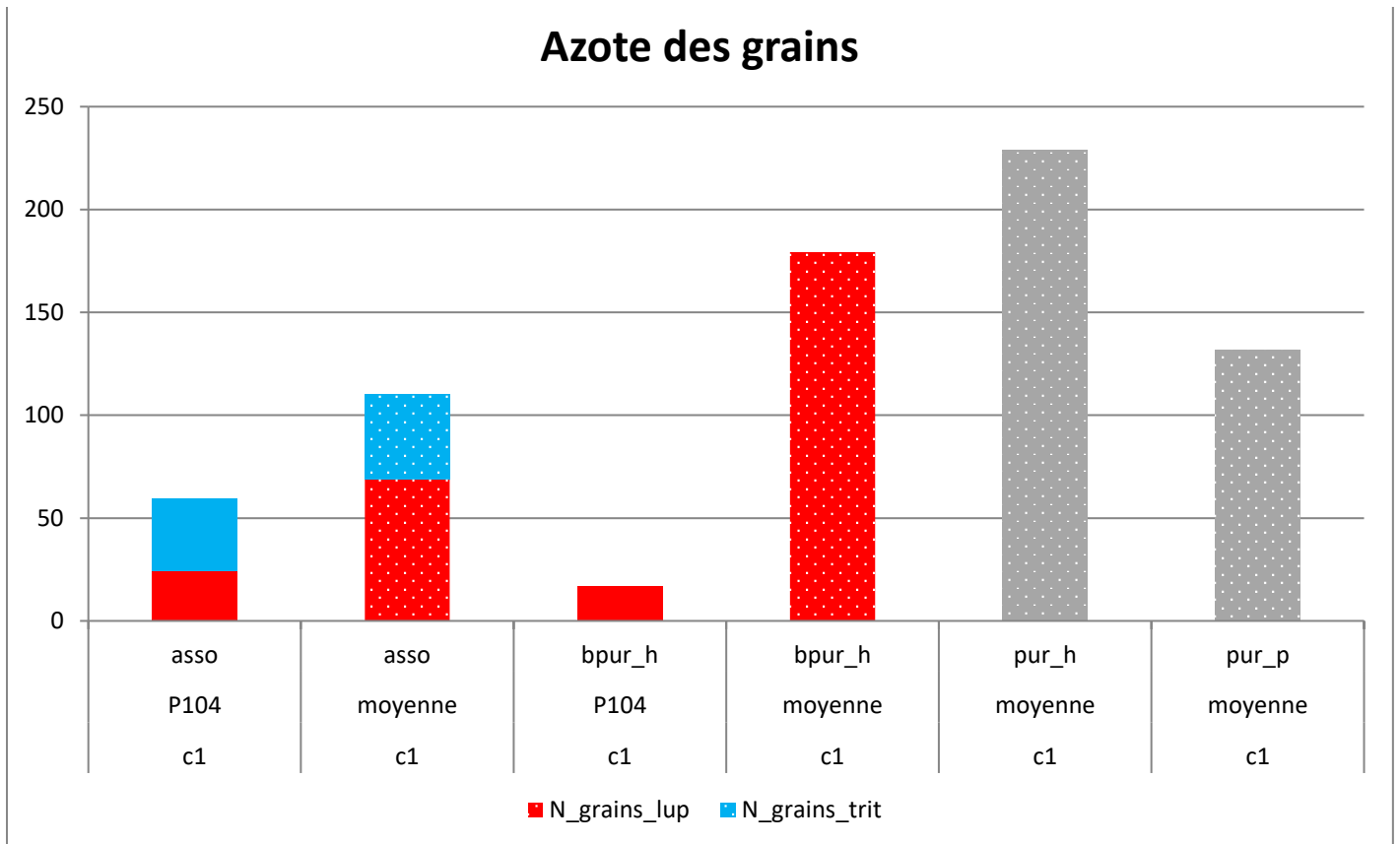




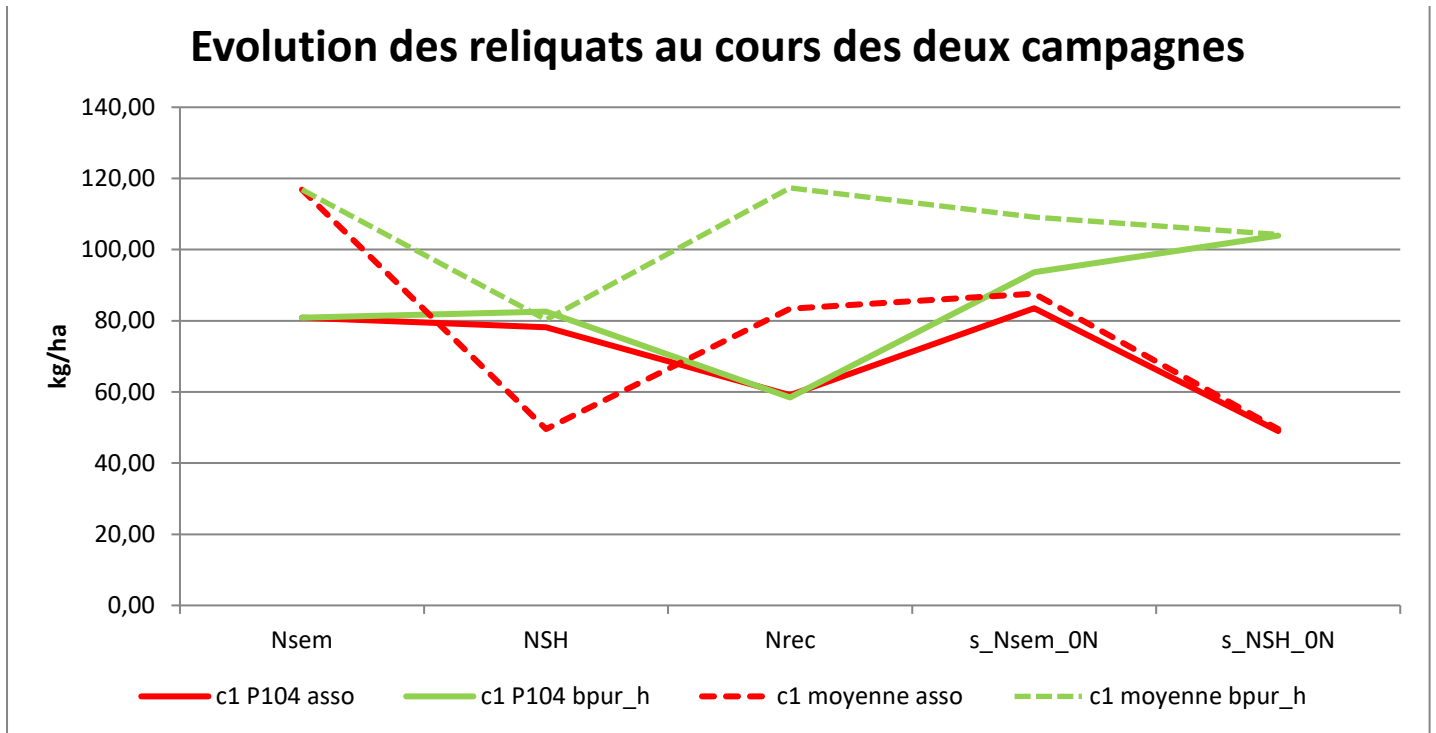
## Part de l'azote du couvert capté dans le sol et dans l'air



## Azote du couvert exporté et restitué du lupin/de l'association

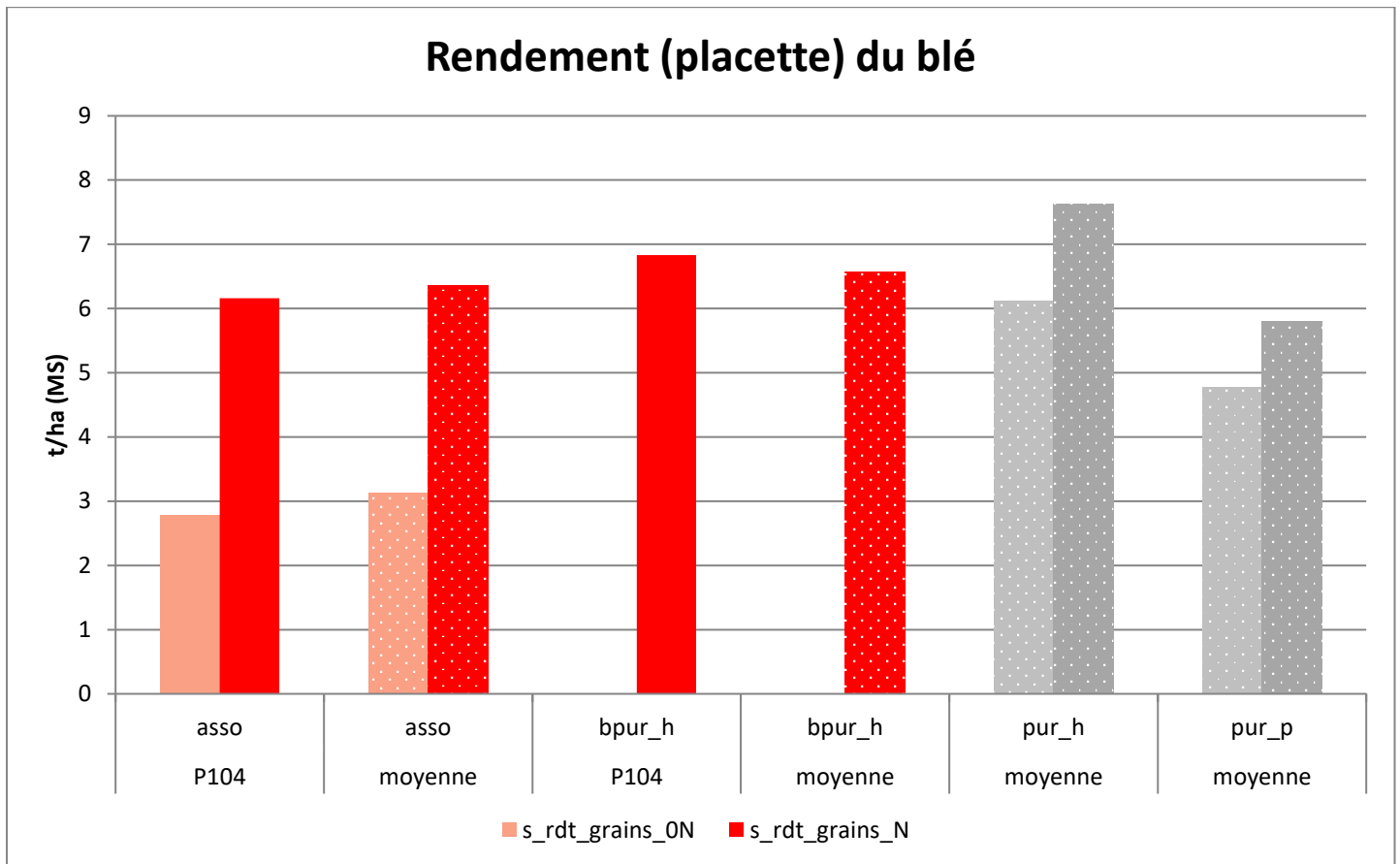


## Reliquats sur la parcelle du lupin/ de l'association

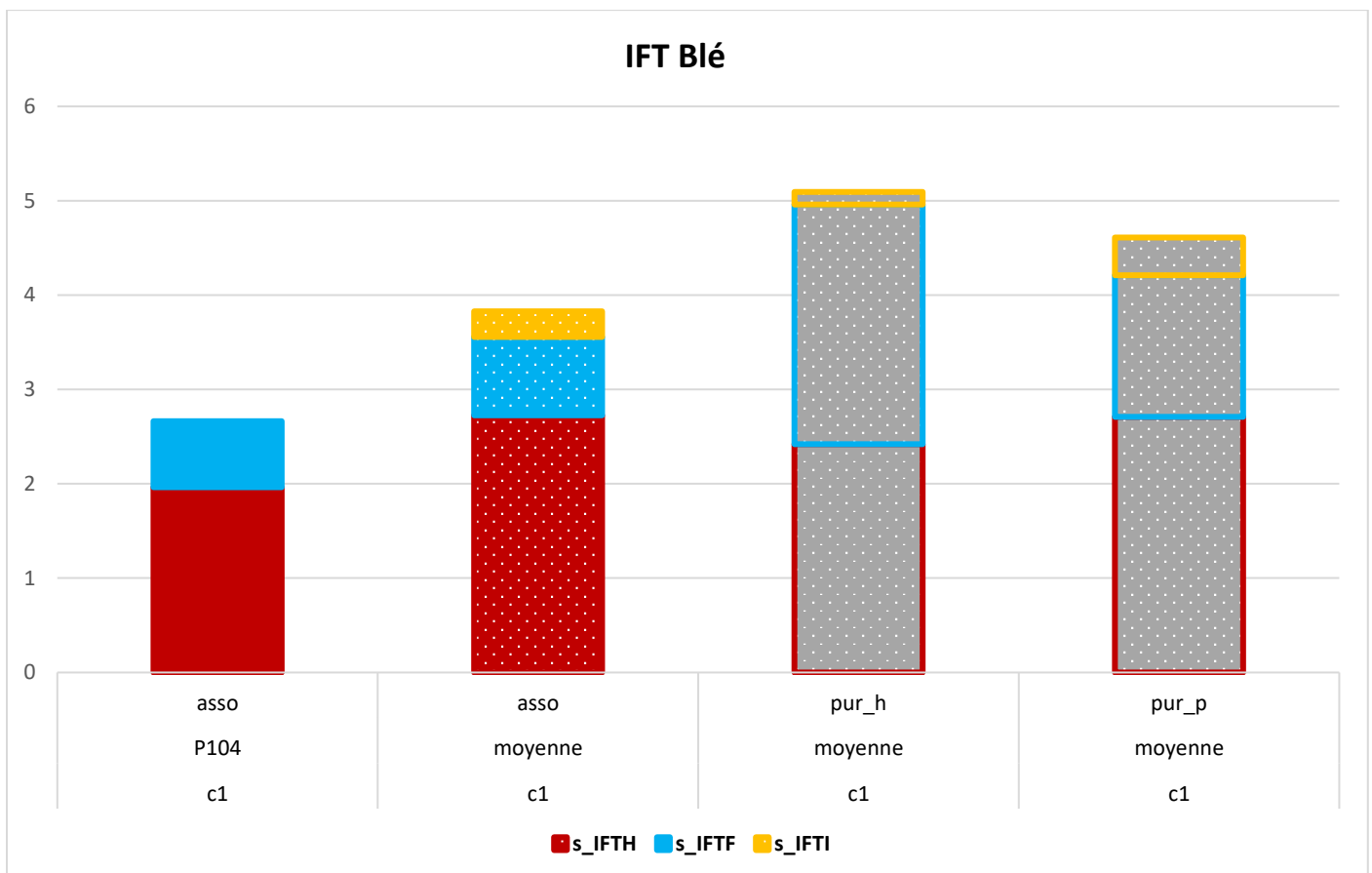
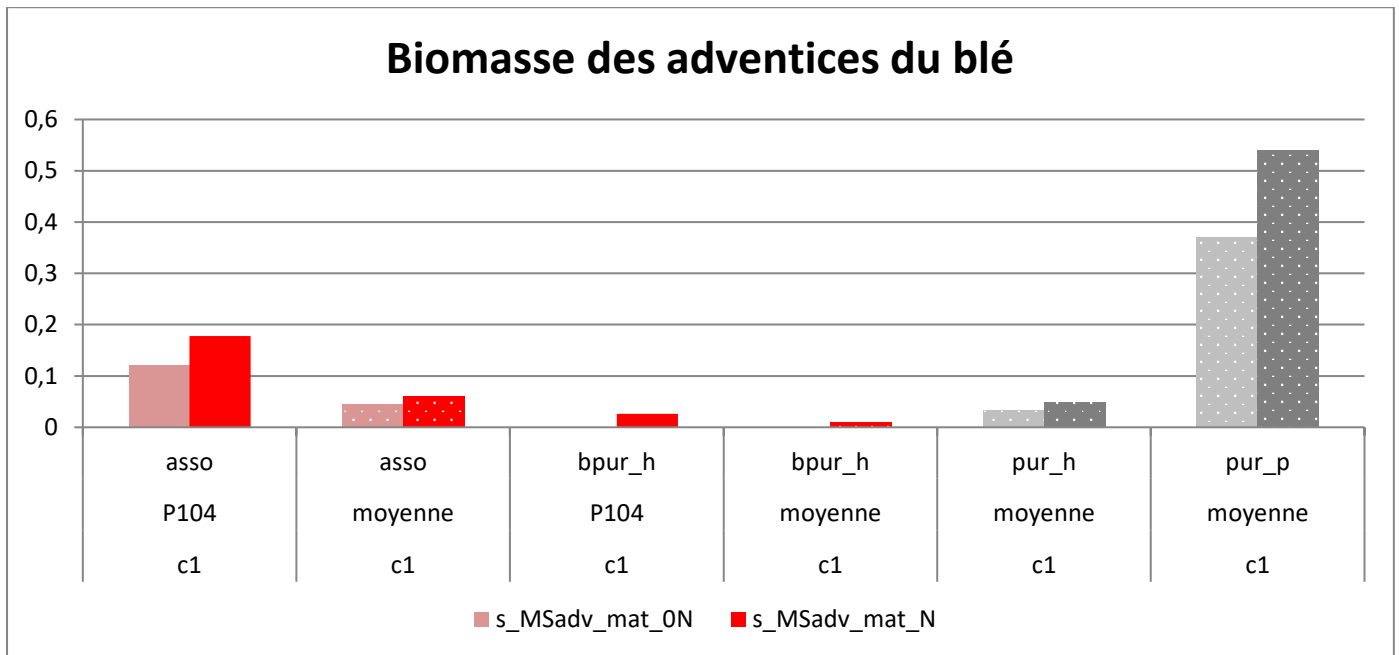




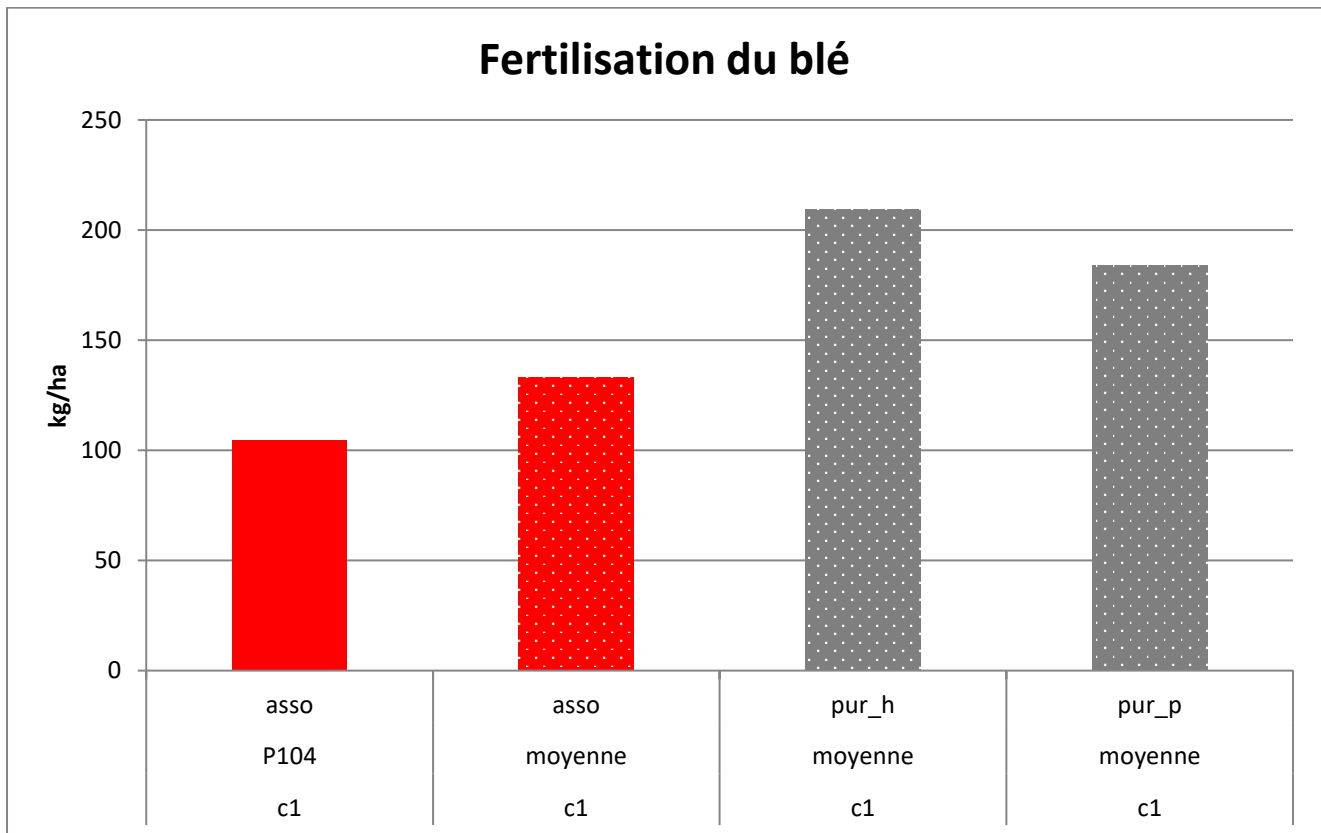
## Rendement de l'orge



## Biomasse des adventices du suivant



## Fertilisation du suivant



## Synthèse générale

	Récolte du lupin	Semis du suivant	récolte du suivant
Rendement	<p><b>Rdt Lupin</b> 0,5 t/ha <i>Asso : 1,4</i> <i>Pur_h : 4,3</i></p> <p><b>Rdt trit</b> 2,0 t/ha <i>Asso : 2,6</i></p>		<p><b>Rendement</b> 6,2 t/ha <i>Asso : 6,6</i> <i>Pur_h : 7,6</i></p> <p><b>ON</b> 2,8 t/ha <i>Asso : 3,2</i> <i>Pur_h : 6,1</i></p>
Azote du couvert	<p><b>N de l'air</b> 22 kg/ha <i>Asso: 67</i> <i>Pur_h : 233</i></p> <p><b>N du sol</b> 64 kg/ha <i>Asso: 105</i> <i>Pur_h : 78</i></p> <p><b>N des racines</b> (≈ 30% du total)</p> <p><b>N des feuilles, tiges et gains</b></p> <p>Export 59 kg/ha <i>Asso:126</i> <i>Pur_h:247</i></p> <p>restitution 27 kg/ha <i>Asso:46</i> <i>Pur_h:59</i></p> <p>restitution</p>		
Azote du sol	<p><b>Reliquat à la récolte</b> 60 kg/ha <i>Asso: 83</i> <i>Pur_h: 44</i></p>	<p><b>Rsem</b> 83 kg/ha <i>Asso : 88</i> <i>Pur_h : 134</i></p> <p><b>RSH</b> 49 Kg/ha <i>Asso : 50</i></p>	
Fertilisation N	<p><b>FertiN</b> 0 u <i>Asso: 18</i> <i>Pur_h: 0</i></p>		<p><b>FertiN</b> 105 u <i>Asso : 133</i> <i>Pur_h : 210</i></p>
Biomasse adventices	<p><b>Adventices</b> 0,26 t/ha <i>Asso : 0,46</i> <i>Pur_h : 0,10</i></p>		<p><b>Adventices</b> 0,18 t/ha <i>Asso : 0,06</i> <i>Pur_h : 0,05</i></p>
IFT	<p><b>IFTH(Nb)</b> 1,8 (1) <i>Asso : 2,0(1,4)</i> <i>Pur_h : 3,1 (2,6)</i></p>		<p><b>IFTH(Nb)</b> 2,0 (2) <i>Asso : 2,7 (3)</i></p>