

VetAgro Sup

Mémoire de fin d'études

Etude de la variabilité des rendements
observés en blé tendre d'hiver en système
de grandes cultures biologiques d'Ile-de-
France

Cyril Sarrazin
Agronomie Productions Végétales et Environnement
2011-2014

VetAgro Sup

Mémoire de fin d'études

Etude de la variabilité des rendements
observés en blé tendre d'hiver en système
de grandes cultures biologiques d'Ile-de-
France

Cyril Sarrazin
Agronomie Productions Végétales et Environnement
2011-2014

Maître de Stage : Charlotte GLACHANT

Tuteur de Stage : Matthieu Capitaine

« L'étudiant conserve la qualité d'auteur ou d'inventeur au regard des dispositions du code de la propriété intellectuelle pour le contenu de son mémoire et assume l'intégralité de sa responsabilité civile, administrative et/ou pénale en cas de plagiat ou de toute autre faute administrative, civile ou pénale. Il ne saurait, en cas, seul ou avec des tiers, appeler en garantie VetAgro Sup. »

Résumé

Les rendements en blé tendre d'hiver en grandes cultures biologiques en région Ile-de-France et plus largement en Europe ont une grande variabilité inter et intra-annuelle. L'étude a pour objectif d'analyser ces variations et d'identifier les facteurs qui en sont responsables. La question suivante se pose : Quelle est la hiérarchisation des facteurs intervenant dans l'élaboration des rendements observés en grandes cultures biologiques d'Ile-de-France et peut-on quantifier l'impact des pratiques culturales sur le rendement ? Les données sont issues du réseau de fermes de références en grandes cultures biologiques d'Ile-de-France suivi par la Chambre d'Agriculture de Seine-et-Marne. Les facteurs qui pèsent le plus dans l'élaboration du rendement sont dans l'ordre : l'année climatique, le précédent, le sol, la fertilisation azotée, le type de variété, la date de semis et la présence de labour. En sols profonds, dans les situations sans apport d'engrais organiques l'effet du précédent est de 22 q/ha entre le précédent luzerne (le meilleur) et le précédent céréales (le moins bon). En sols intermédiaires séchant, cette différence descend à 15 q/ha. L'effet de la fertilisation azotée sur le rendement n'a pas pu être quantifié car dans le seul cas étudié (sol profond, précédent féverole et pois) il ne ressort pas significatif. L'efficacité des apports varie suivant les années météo. La quantification des autres facteurs n'a pas pu être réalisée compte tenu du trop faible nombre de données disponibles.

Mots clés : agriculture biologique, blé tendre d'hiver, rendement, effet précédent, fertilisation azotée, Ile-de-France, sol

Abstract

The yields of winter wheat in organic stockless systems are very variable between the years but also in a same year. The aim of study is to examine this yield variation and to identify the factors which are responsible for it. The problematic is: what is the hierarchical order of the factors in the drawing up of yield and is it possible to quantify the impact of the agricultural practices on the yield? The study uses the data of 12 stockless organic farms in the region of Ile-de-France. Factors which are the most important in the drawing up of yield are in order : the climate, the previous crop, the soil, the nitrogen fertilization, the type of crop variety, the sowing date and the ploughing. In deep soils, without any nitrogen fertilization, the effect of previous crop is of 22 q/ha between the alfalfa previous crop (the best) and cereal previous crop (the worst). In the dry intermediate soils, this effect is only of 15 q/ha. The effect of nitrogen fertilization on yield has not been quantified. In the only case where the effect of nitrogen fertilization has been studied, the effect was not significant. The quantification of the others factors has not been studied because of the number of available data.

Keyword: organic farming, winter wheat, yield, previous crop effect, nitrogen fertilization, Ile-de-France, soil

Remerciements

Je tiens à remercier tout particulièrement Charlotte GLACHANT, ma maîtresse de stage pour son accompagnement et son aide tout au long de ce stage.

Je remercie, Matthieu CAPITAINE, mon tuteur de stage pour ses conseils.

Un grand merci à Claude AUBERT, pour son aide précieuse dans l'identification des sols et ses nombreux conseils.

Je remercie également Sarah SANCHEZ et tout particulièrement Mélodie SANCHEZ pour leur aide en statistique et pour la relecture du rapport.

Abréviations

AB : Agriculture Biologique

COMIFER : Comité français d'études et de développement de la fertilisation raisonnée

N : Azote

OAD : outil d'aide à la décision

PMG : poids de mille grains

RSH : Reliquat sortie hiver

SAU : Surface agricole utile

Table des matières

INTRODUCTION	1
I. CONTEXTE DE L'ETUDE ET ETAT DE L'ART	2
1) LE CONTEXTE DES GRANDES CULTURES BIOLOGIQUES EN FRANCE ET EN ILE-DE-FRANCE	2
1.1 <i>Les grandes cultures biologiques : un mode de production qui se développe mais qui souffre d'un manque de références</i>	2
1.2 <i>Des systèmes de grandes cultures biologiques franciliens diversifiés</i>	3
1.2.1 Des assolements diversifiés basés sur les légumineuses et le blé	3
1.2.2 Des rotations avec ou sans luzerne.....	3
1.3 <i>Des rendements en grandes cultures biologiques variables</i>	3
1.4 <i>Des types de sols franciliens avec des potentiels de rendement différents</i>	4
2) LES PRATIQUES CULTURALES QUI IMPACTENT LE RENDEMENT.....	4
2.1 <i>Des variétés avec des potentiels de rendement et de qualité différents</i>	4
2.2 <i>Une gestion de l'azote basée sur la rotation et les apports de fertilisants organiques</i>	4
2.2.1 Le précédent : un point clé pour la gestion de la fertilisation azotée	5
2.2.2 Les engrais organiques : une source d'azote minérale disponible rapidement	6
2.2.3 Les amendements organiques : de l'azote minéral disponible sur le long terme	6
2.3 <i>Une gestion des adventices basée sur les leviers agronomiques et le désherbage mécanique</i>	7
2.3.1 La rotation : un point clé pour la maîtrise de l'enherbement	7
2.3.2 Le labour et le déchaumage	7
2.3.3 Les modalités de semis à ne pas négliger	8
2.3.4 La gestion curative des adventices par le désherbage mécanique.....	8
2.3.5 Raisonner la fertilisation azotée	9
2.4 <i>La gestion des ravageurs et des maladies</i>	9
2.4.1 Les actions sur le système de culture.....	9
2.4.2 Les actions phytotechniques.....	9
2.4.3 Des méthodes curatives peu efficaces.....	9
3) LA PROBLEMATIQUE.....	10
II. MATERIEL ET METHODE	11
1) LE SUIVI DU RESEAU DE FERMES DE REFERENCES EN GRANDES CULTURES BIOLOGIQUES D'ILE-DE-FRANCE	11
1.1 <i>Un réseau représentatif des exploitations de grandes cultures biologiques d'Ile-de-France</i>	11
1.2 <i>L'enquêtes sur les données technique réalisées sur le réseau de fermes de références</i>	11
1.3 <i>La base de données</i>	12
2) CARACTERISATION DES SITUATIONS PEDOCLIMATIQUES	12
2.1 <i>Collecte des données sur les sols et identification des types de sols</i>	12
2.1.1 La classification agronomique et comportementale des sols de Seine-et-Marne.....	12
2.1.2 L'enquête sur les types de sols.....	13
2.1.3 La méthodologie d'identification des types de sols.....	14
2.1.4 Résultat de l'identification des sols du réseau.....	14
2.1.5 Regroupement des sols par 7 grands types de sols.....	14
2.2 <i>Caractérisation des années climatiques</i>	15
3) PRESENTATION DES ANALYSES UTILISEES	16
3.1 <i>Les représentations graphiques</i>	16
3.1.1 Le boxplot.....	16
3.1.2 Le nuage de point	17
3.2 <i>L'arbre de régression</i>	17

3.3	<i>L'analyse de variance et le test de Newman Keuls</i>	18
3.4	<i>L'analyse des correspondances multiples et la classification</i>	18
4)	ORGANISATION ET MISE EN FORME DES DONNEES	19
4.1	<i>Choix des modalités pour chaque facteur</i>	19
4.1.1	La fertilisation azotée	19
4.1.2	Le rendement et le taux de protéine.....	20
4.1.3	Le désherbage mécanique, la date de semis et le travail du sol	20
4.1.4	Le type de précédent et de variété.....	21
5)	JEUX DE DONNEES UTILISES.....	21
III.	ANALYSE DES RESULTATS ET DISCUSSIONS	22
1)	HIERARCHISATION DES FACTEURS INTERVENANTS DANS L'ELABORATION DU RENDEMENT.....	22
1.1	<i>Analyse facteur par facteur</i>	22
1.1.1	L'agriculteur.....	22
1.1.2	L'année et le type de sol.....	22
1.1.3	Le type de précédent, la fertilisation azotée et le type de variété.....	24
1.1.4	Le nombre de désherbage mécanique et la présence de binage.....	26
1.1.5	La date de semis, la présence de labour et le nombre de déchaumage.....	26
1.2	<i>Analyse de l'impact des facteurs par l'intermédiaire de l'arbre de régression</i>	27
2)	QUANTIFICATION DE L'IMPACT DES PRATIQUES SUR LE RENDEMENT	28
2.1	<i>Quantification de l'impact de la fertilisation azotée sur le rendement</i>	29
2.1.1	Cas des sols profonds	29
2.1.2	Cas des sols intermédiaires séchants.....	30
2.2	<i>Quantification de l'impact du type précédent sur le rendement</i>	31
2.2.1	Cas des sols profonds	31
2.2.2	Cas des sols intermédiaires séchants.....	32
3)	ETUDE DE L'IMPACT DE L'ENSEMBLE DES PRATIQUES CULTURALES SUR LE RENDEMENT.....	33
3.1	<i>Etude sur le jeu de données initial</i>	33
3.1.1	Résultat de l'ACM	33
3.1.2	Résultat de la classification.....	33
3.2	<i>Etude sur le jeu de données complètes</i>	35
3.2.1	Résultats de l'ACM.....	35
3.2.2	Résultats de la classification.....	35
4)	DISCUSSION DES RESULTATS	36
IV.	LIMITES ET PERSPECTIVES	37
1)	LES LIMITES DE L'ETUDE.....	37
1.1	<i>La précision des données</i>	37
1.2	<i>La nature et le nombre de données disponibles</i>	37
1.3	<i>Le regroupement des modalités</i>	37
1.4	<i>L'arrière effet des engrais et des amendements organiques</i>	37
2)	PERSPECTIVES D'ETUDE	38
2.1	<i>Etudier plus en détail le taux en protéine</i>	38
2.2	<i>Utiliser l'OAD pour la fertilisation de printemps du blé tendre d'hiver de la CA77</i>	38
2.3	<i>Réaliser des bilans minéraux</i>	38
2.4	<i>Continuer le suivi d'enherbement</i>	39
	CONCLUSION	40
	BIBLIOGRAPHIE.....	42
	ANNEXE	45

Table des figures

Figure 1: évolution du nombre d'exploitations et des surfaces conduites en grandes cultures bio (conversion et AB) en Ile-de-France entre 1998 et 2012	2
Figure 2: assolement des exploitations produisant des grandes cultures biologiques (Conversion et AB) en Ile-de-France : données de 2005 à 2011	3
Figure 3 : rotation type basée sur la luzerne des grandes cultures biologiques en Ile-de-France ...	3
Figure 4 : rotation type sans luzerne des grandes cultures biologiques en Ile-de-France	3
Figure 5 : rendements moyens 2005-2011 par culture en bio (bio + conversion) sur l'ensemble de la région Ile-de-France	3
Figure 6 : Variation des rendements de blé tendre biologique en Ile-de-France de 2003 à 2013 ..	4
Figure 7 : synthèse de 11 essais de variétés de blé tendre de 2013 en zone Centre	4
Figure 8: cinétique d'absorption de l'azote d'un blé tendre d'hiver en fonction de son précédent	5
Figure 9 : simulation avec le logiciel STICS de l'apparition du stress azotée sur blé et épeautre en fonction du précédent	5
Figure 10 : classement des cultures selon leur pouvoir de compétition vis-à-vis des adventices...	7
Figure 11 : illustration de différents pouvoirs couvrants de blé tendre d'hiver : photos prises à environ 2 m de la surface du sol (Renan à gauche, Caphorn à droite) (Laurent Poiret)	7
Figure 12 : densité de vulpins/m ² sur céréale en fonction de la date de semis.....	8
Figure 13: facteurs influençant l'efficacité du désherbage mécanique	8
Figure 14 : rendement d'un blé tendre d'hiver en fonction du nombre d'épis de graminées et de différente modalité de désherbage mécanique	8
Figure 15: répartition géographique des 12 fermes de références en grandes cultures biologiques d'Ile-de-France	11
Figure 16: assolement des fermes de références de 2003 à 2013 (conversion et AB).....	11
Figure 17 : rendements moyens 2005-2011 en blé biologique (bio + conversion) sur le réseau de fermes de références et sur l'ensemble de la région Ile-de-France	11
Figure 18: diagramme du comportement des types de sol de la classification des sols de Seine-et-Marne en fonction du flétrissement des cultures, de la reprise en bonne condition au printemps et de la présence de système drainage	13
Figure 19: schéma de la méthodologie utilisée pour l'identification des sols	14
Figure 20 : répartition des types de sol sur le réseau en fonction de leur surface.....	14
Figure 21 : répartition des types de sols sur le réseau de ferme de référence en fonction de leur surface selon la classification à 7 classes	14
Figure 22 : pluviométrie hivernale (octobre à mars) de la station de Melun-Villaroche des années étudiées et de la normale (1980-2010).	15
Figure 23 : pluviométrie printanière de la station de Melun-Villaroche des années étudiées et de la normale (1980-2010).....	15
Figure 24 : nombre de jours pour avoir 15 mm de pluie sur la période de février à juillet pour les années de 2003 à 2007	15
Figure 25: nombre de jours pour avoir 15 mm de pluie sur la période de février à juillet pour les années de 2008 à 2013	15
Figure 26 : boxplot représentant le rendement en fonction du type de précédent et de la fertilisation	17
Figure 27 : RSH moyen sur 3 horizons (et écart type) suivant le précédent en AB en Ile-de-France (données de 2005 à 2014).....	21
Figure 28: variation des rendements en fonction des agriculteurs	22
Figure 29 : variation des rendements en fonction des années	22
Figure 30 : variation des rendements en fonction des années météo	23
Figure 31: variation des rendements en fonction des grandes classes de types de sol.....	23
Figure 32: variation des rendements en fonction du type de sol et des types d'années météo	24
Figure 33: variation des rendements en fonction du type de précédent	24

Figure 34: variation des rendements en fonction de la fertilisation azotée	24
Figure 35: variation des rendements en fonction de la fertilisation azotée et du précédent	25
Figure 36: variation des rendements en fonction de du type de variété	26
Figure 37: variation des rendements en fonction de la date de semis	26
Figure 38: variation des rendements en fonction de la présence de labour.....	26
Figure 39 : arbre de régression sur le jeu de données initial	27
Figure 40 : rendement en fonction de la dose azotée en précédent LG+ (féverole et pois) en sols profonds, en variété à protéine	29
Figure 41 : rendement en fonction de la fertilisation azotée en sols profonds en précédent LG+ : identification de trois zones.....	29
Figure 42 : courbe de tendance de l'évolution du rendement en fonction de la dose d'azote en précédent féverole et pois en sols profonds	30
Figure 43 : courbe de tendance de l'évolution du rendement en fonction de la dose d'azote en précédent féverole et pois en sol intermédiaires séchants.....	30
Figure 44 : rendement du blé en fonction du type de précédent en sols profonds, avec une fertilisation nulle à très faible avec des variétés à protéine.....	31
Figure 45 : rendement du blé en fonction du type de précédent en sols intermédiaires séchants.....	32
Figure 46 : graphique des modalités de l'ACM sur le jeu de données initial.....	33
Figure 47 : graphique des modalités de l'ACM sur le jeu de données complètes.....	35

Table des tableaux

Tableau 1: valeur de la minéralisation des résidus de culture de différents précédents.....	5
Tableau 2: effet d'un apport d'engrais organique de 60 kg de N/ha au stade fin tallage	6
Tableau 3 effet d'un apport de compost de 15 à 20 t par rapport à un témoin non amendé (base 100):	7
Tableau 4 : données relevées sur le réseau de fermes de références selon les années	11
Tableau 5 : composition azotée des engrais et amendements organiques utilisés sur le réseau ...	20
Tableau 6 : Jeu de données utilisé lors de l'étude	21
Tableau 7 : résultat du test de Newman Keuls sur le facteur type d'année météo.....	23
Tableau 8 : résultat du test de Newman Keuls sur le facteur type de sol.....	23
Tableau 9 : résultat du test de Newman Keuls sur le facteur précédent.....	24
Tableau 10 : résultat du test de Newman Keuls sur le facteur fertilisation azotée	25
Tableau 11: résultat du test de Newman Keuls sur le facteur variété	26
Tableau 12 : résultat du test de Newman Keuls sur le facteur présence date de semis.....	26
Tableau 13 : résultat du test de Newman Keuls sur le facteur présence de labour	26
Tableau 14 : effectif de chaque couple « type d'année météo/variété » dans chacune des 3 zones de la figure 41.....	29
Tableau 15: nombre d'individus en fonction du précédent et du type d'année météo pour l'étude de l'impact du précédent en sols profonds	30
Tableau 16 : résultat du test de Newman Keuls sur l'effet du précédent sur sols profonds	32
Tableau 17 : nombre d'individus en fonction du précédent et du type d'année météo pour l'étude de l'impact du précédent en sols intermédiaires séchants.....	32
Tableau 18 : résultat du test de Newman Keuls sur l'effet du précédent sur sols intermédiaires séchants	32
Tableau 19 : modalités caractérisant la classe 1 de la classification	33
Tableau 20 : modalités caractérisant la classe 2 de la classification	34
Tableau 21 : modalités caractérisant la classe 3 de la classification	34
Tableau 22 : modalités caractérisant la classe 4 de la classification	34

Tableau 23 : modalités caractérisant la classe 5 de la classification	34
Tableau 24 : modalités caractérisant la classe 6 de la classification	34
Tableau 25 : modalités caractérisant la classe 7 de la classification	34
Tableau 26 : modalités caractérisant la classe 8 de la classification	34

INTRODUCTION

Les crises sanitaires répétées et les interrogations concernant l'impact de l'agriculture sur l'environnement ont contribué à la prise de conscience de nouveaux enjeux par les consommateurs et pouvoirs publics français. Cela se traduit par une mutation progressive des attentes envers l'agriculture, en termes de qualité des produits comme de préservation de l'environnement. Ces exigences récentes participent à la mise en place d'un contexte favorable à l'agriculture biologique (AB).

Son développement au cours des dernières années n'a cessé de prendre de l'ampleur. La consommation de produits biologiques en France connaît une progression sans précédent. Afin de continuer à satisfaire ces besoins grandissants, il est essentiel que la production s'ajuste en conséquence.

En AB, la complémentarité entre les cultures et l'élevage est un principe de base. Alors que les effluents d'élevage contribuent à la fertilisation des cultures, la présence de prairies participe à la lutte contre les adventices. Par conséquent, les systèmes céréaliers biologiques sans élevage sont confrontés à des freins techniques importants. Pour soulever ces derniers il convient d'étudier et d'analyser ces systèmes pour produire des références qui serviront à conseiller les agriculteurs. C'est dans cette optique que la Chambre d'Agriculture de Seine-et-Marne a mis au point un suivi technico-économique de fermes de références en grandes cultures biologiques en Ile-de-France depuis 2003. Le stage consiste à approfondir l'analyse technique de ce réseau de fermes de références pour évaluer l'impact des pratiques sur le rendement.

Dans un premier temps, les éléments de contexte propres aux grandes cultures biologiques et un état de l'art sur l'impact des pratiques culturales sur le rendement seront présentés. Ces deux premiers points aboutiront à la problématique. Par la suite, nous présenterons le réseau de fermes de références qui constitue le matériel de l'étude et nous expliquerons la méthodologie mise en place. Ensuite, les résultats obtenus seront exposés. Enfin, les limites de l'étude et les perspectives seront abordées.

Figure 1: évolution du nombre d'exploitations et des surfaces conduites en grandes cultures bio (conversion et AB) en Ile-de-France entre 1998 et 2012 (source : Glachant 2013)

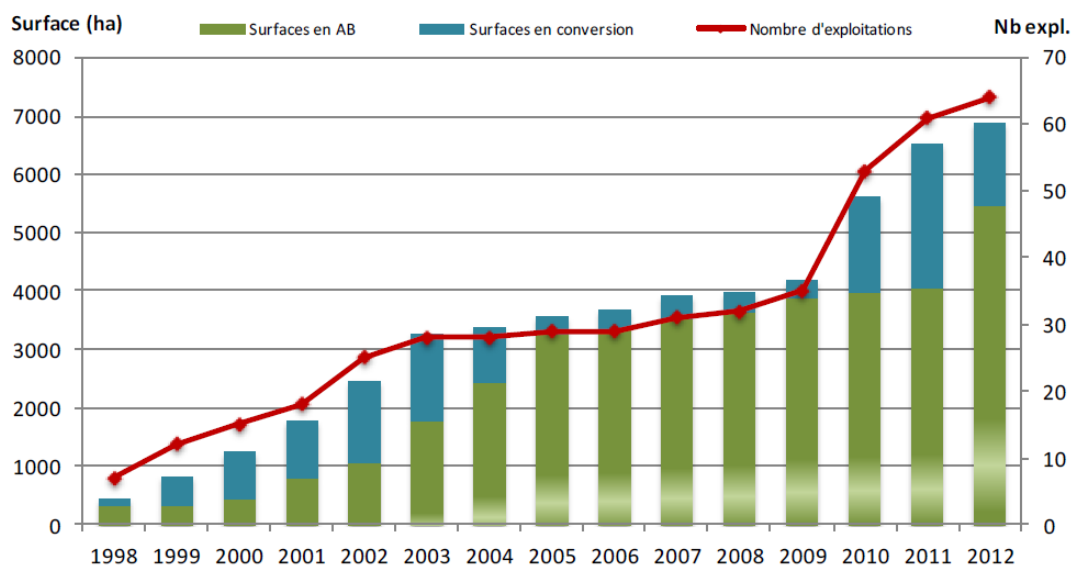
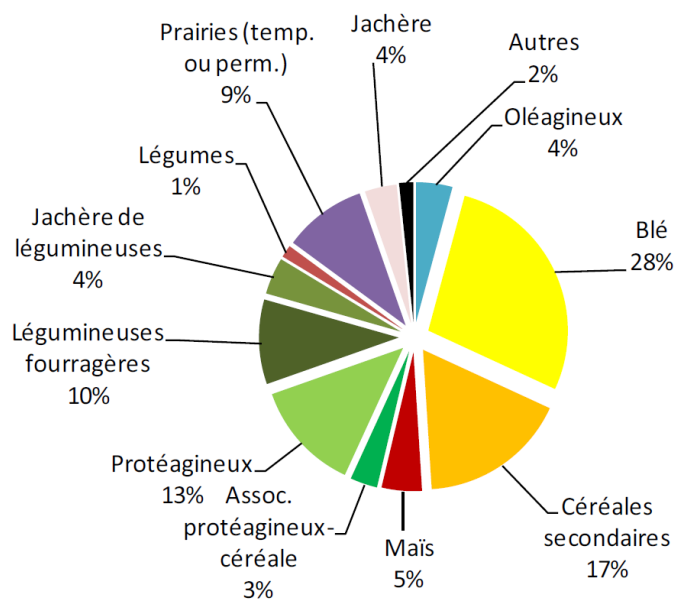


Figure 2: assolement des exploitations produisant des grandes cultures biologiques (Conversion et AB) en Ile-de-France : données de 2005 à 2011 (source : Glachant, 2013)



I. CONTEXTE DE L'ETUDE ET ETAT DE L'ART

Nous allons tout d'abord présenter le contexte des grandes cultures biologiques et ensuite exposer les différentes pratiques qui peuvent influencer le rendement.

1) Le contexte des grandes cultures biologiques en France et en Ile-de-France

Des chiffres clés sur l'AB en particulier sur les systèmes de grandes cultures seront abordés dans un premier temps. Dans un deuxième temps, une description des systèmes de grandes cultures biologiques présents en Ile-de-France sera faite. Ensuite, les rendements obtenus en grandes cultures biologiques en Ile-de-France seront exposés. Enfin, une présentation des sols présents en Ile-de-France sera effectuée.

1.1 Les grandes cultures biologiques : un mode de production qui se développe mais qui souffre d'un manque de références

L'AB en France ne cesse de se développer depuis une quinzaine d'années. Elle a connu une évolution particulièrement favorable ces dernières années avec une augmentation de 90 % de la surface et de 113 % du nombre d'exploitations entre 2007 et 2013. Au 15 mai 2014, le nombre d'exploitations en AB était de plus de 26 500 soit 5,4 % des exploitations françaises et la surface convertie en AB était de 930 868 ha soit 3,9 % de la surface agricole utile (SAU) nationale (Agence Bio, 2014a). Cependant il existe des grandes disparités suivant les systèmes de production et par conséquent suivant les régions. En effet, seulement 1,7 % des surfaces nationales de grandes cultures (dont légumes secs) étaient cultivées en AB fin 2013 (Agence Bio, 2014a).

En 2013, la région Ile-de-France était placée au dernier rang français en termes de nombre d'exploitations avec 3,5 % des exploitations en AB et au 19^{ème} rang en termes de SAU avec 1,6 % de la SAU en AB (Agence Bio, 2014b). Les exploitations spécialisées en grandes cultures en Ile-de-France représentent 75 % des exploitations de la région (Chambre d'Agriculture d'Ile-de-France, 2014) mais seulement 35 % des exploitations en AB (Glachant, 2013). Les grandes cultures biologiques ne sont pas très importantes en Ile-de-France mais elles se développent (Figure 1). Elles ont connu deux périodes de nette augmentation : 2000-2002 et 2009-2010 où les aides étaient conséquentes et le marché favorable (Glachant, 2013).

Le faible pourcentage de l'AB en grandes cultures s'explique en partie par des difficultés techniques à conduire un système de grandes cultures biologiques mais également par de la concurrence avec des cultures à forte valeur ajoutée telle que la betterave ou la pomme de terre, et par la présence de sol à haut potentiel dans les régions de grandes cultures ce qui induit une baisse notable du rendement lors du passage en AB (David, 2009). Ainsi, pour développer l'AB en grandes cultures il convient d'étudier ces systèmes pour mieux les comprendre et ainsi lever ces difficultés techniques. Ces actions sont notamment présentes dans l'axe 1 du programme Ambition Bio 2017 (MAAF, 2013) qui est décliné au niveau régional par le plan de développement de l'AB en Ile-de-France (DRIAAF Ile-de-France et Région Ile-de-France, 2008). C'est dans ce cadre que la Chambre d'Agriculture de Seine-et-Marne a mis en place un observatoire technico-économiques des grandes cultures biologiques d'Ile-de-France. Cet observatoire intègre le suivi d'un réseau de fermes de références et une enquête sur les assolements et les rendements de l'ensemble des exploitations de grandes cultures biologiques d'Ile-de-France.

Figure 3 : rotation type basée sur la luzerne des grandes cultures biologiques en Ile-de-France (source : Glachant, 2013)

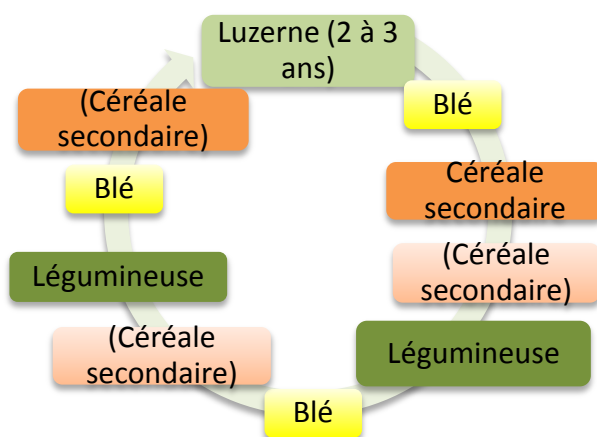


Figure 4 : rotation type sans luzerne des grandes cultures biologiques en Ile-de-France (source : Glachant, 2013)

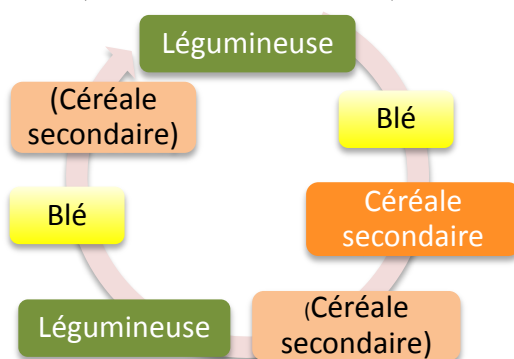
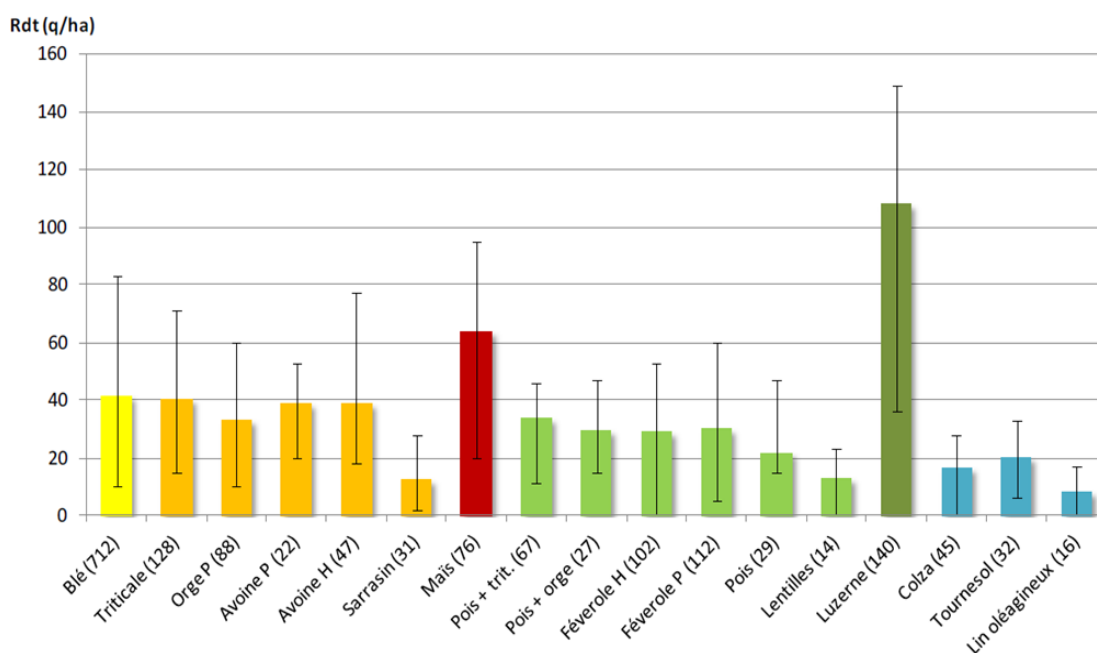


Figure 5 : rendements moyens 2005-2011 par culture en bio (bio + conversion) sur l'ensemble de la région Ile-de-France (source : Glachant, 2013)



*Entre parenthèse : le nombre de parcelles concernées
Bâtonnets : minimum et maximum parcelle sur la période*

1.2 Des systèmes de grandes cultures biologiques franciliens diversifiés

L'enquête menée sur l'ensemble des exploitations a permis d'identifier l'assolement et les rotations types rencontrées en grandes cultures biologiques en Ile-de-France.

1.2.1 *Des assolements diversifiés basés sur les légumineuses et le blé*

Entre 35 et 40 cultures différentes sont cultivées chaque année sur les exploitations de grandes cultures biologiques (polycultures strictes, polycultures + maraîchage et/ou arboriculture et polyculture élevage) (Glachant, 2013). L'assolement des exploitations de grandes cultures biologiques d'Ile-de-France est basé sur les légumineuses et le blé qui représentent respectivement 30 % et 28 % de l'assolement (Figure 2). Les légumineuses permettent d'apporter de l'azote dans la rotation et de limiter les apports d'engrais organiques grâce à la fixation de l'azote atmosphérique. Les légumineuses majoritaires sont la luzerne, la féverole et les associations protéagineux-céréales (en majorité pois-triticales et pois-orge). Les autres légumineuses sont le trèfle, la lentille, le lupin, le soja, le pois et le haricot vert. Le blé est une culture rémunératrice qui offre une marge intéressante. Les céréales secondaires telles que le triticales, l'orge, l'avoine ou encore le sarrasin représentent 17 % de l'assolement. Des cultures comme le maïs ou les oléagineux (colza, lin, et tournesol) sont cultivées en moindre quantité.

1.2.2 *Des rotations avec ou sans luzerne*

Les agriculteurs suivent une rotation de base, cependant celle-ci n'est pas toujours respectée en raison des opportunités du marché le plus souvent, mais parfois aussi des conditions d'enherbement et situation azotée de la parcelle. Deux rotations types sont rencontrées :

- des rotations longues (6 à 10 ans, 8 en moyenne) reposant sur la luzerne : elles représentaient jusqu'en 2010-2011 environ 55 % des exploitations en grandes cultures biologiques et tendent à être plus fréquentes aujourd'hui.
- des rotations plus courtes (4 à 6 ans) reposant sur des légumineuses à graines essentiellement.

- Les rotations longues avec luzerne

Cette rotation type peut être plus ou moins longue suivant les cas, avec l'introduction ou non de céréales secondaires en deuxième voire troisième paille. En général, elle comporte 3 blés (Figure 3). Cette rotation type est pratiquée sur environ 80 % des parcelles ayant une rotation avec de la luzerne. Les légumineuses autres que la luzerne sont principalement la féverole, le pois, le trèfle ou des associations protéagineux céréales. Les céréales secondaires sont majoritairement le triticales, l'orge et l'avoine.

- Les rotations sans luzerne

Ces rotations sont pratiquées dans les zones où la culture de la luzerne est difficile pour des raisons de commercialisation, d'équipement ou de type de sol. La rotation type est généralement conduite sur 6 ans, mais elle peut être plus ou moins longue suivant les cas, avec l'introduction ou non de céréales secondaires en deuxième voire troisième paille (Figure 4). En général, elle comporte 2 blés. Cette rotation type est pratiquée sur environ 60 % des parcelles ayant une succession sans luzerne.

1.3 Des rendements en grandes cultures biologiques variables

Les données récoltées sur les exploitations de grandes cultures biologiques d'Ile-de-France ont permis de mettre en évidence une forte variabilité du rendement (Figure 5). Ainsi, le rendement

Figure 6 : Variation des rendements de blé tendre biologique en Ile-de-France de 2003 à 2013 (source : Glachant, 2013)

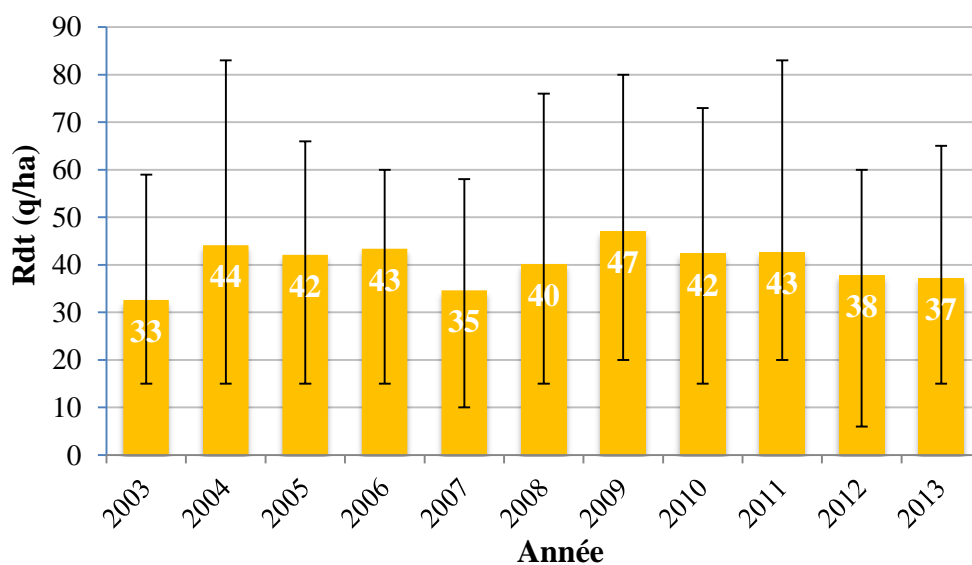
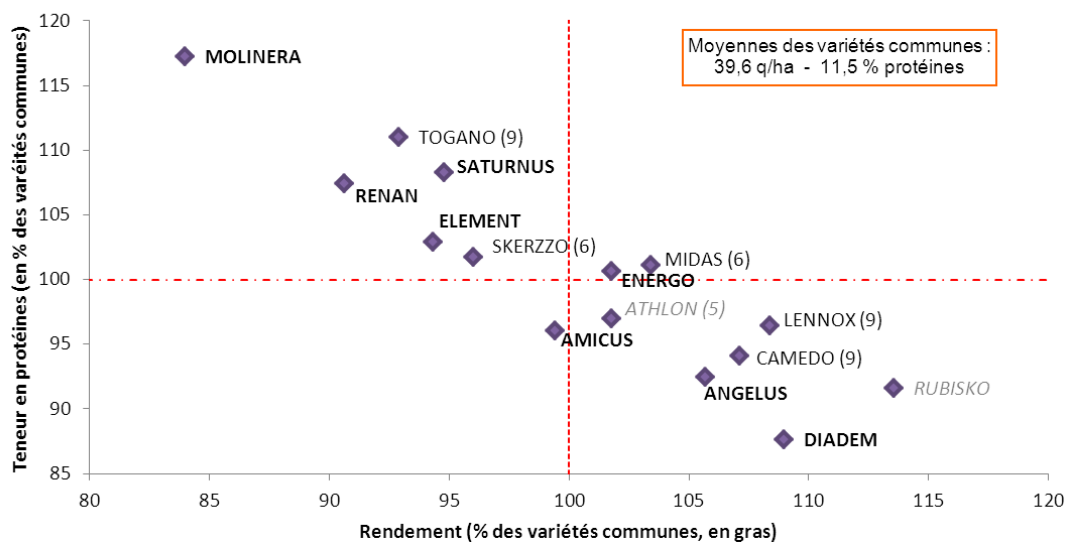


Figure 7 : synthèse de 11 essais de variétés de blé tendre de 2013 en zone Centre (source : Fontaine, 2014)

10 essais regroupés (37, 41, 18, 45, 91, 89, 21x2, 39, 63). Entre parenthèses : nombre d'essais où est la variété. Variétés communes en gras.



moyen en blé tendre d'hiver est de 40 q/ha mais il varie de moins de 10 q/ha à plus de 80 q/ha. La variation est également importante pour toutes les autres cultures. Ces variations de rendement sont inter-annuelles, ce qui montre l'impact du climat sur le rendement, mais également intra-annuelles (Figure 6). Cette variabilité n'est pas spécifique à la Région Ile-de-France, elle est généralisée dans tous les systèmes biologiques européens. Ce constat a été fait par un groupe d'experts européens sur l'AB créé en 2013 dans le cadre de European Innovation Partnership (Bachinger et al, 2014). Pour une même région agricole, les rendements en blé tendre d'hiver peuvent varier de moins de 10 q/ha à plus de 65 q/ha (Le clech et al., 2003). L'objectif du stage est d'approfondir l'étude des résultats techniques afin d'expliquer les variations de rendement observées. Plusieurs cultures ont fait l'objet d'analyse. Dans ce document, nous allons prendre l'exemple du blé tendre d'hiver.

1.4 Des types de sols franciliens avec des potentiels de rendement différents

Il existe différents types de sols en région Ile-de-France (Aubert et al., 2005). Les potentiels de rendement peuvent être très différents suivant ces sols. Par exemple, le potentiel en blé conventionnel non irrigué pour un limon sableux engorgé est de 40 à 60 q/ha alors qu'il est de 80 à plus de 100 q/ha pour un limon argileux profond. L'hétérogénéité des types de sol est donc une des explications de la variabilité intra-annuelle des rendements observés.

Cependant, d'autres facteurs interviennent, en particulier le système de culture et l'itinéraire technique. Ces derniers ont donc un impact direct sur les résultats économiques des exploitations. Pour expliquer ces variations, il convient donc d'identifier les facteurs qui influencent les rendements des exploitations biologiques et d'identifier les leviers d'actions au niveau de l'itinéraire technique et du système de culture qui permettent d'améliorer ces rendements.

2) **Les pratiques culturelles qui impactent le rendement**

Outre les variations de rendement dues au sol et au climat, sur lesquels l'agriculteur n'a pas d'influence, d'autres sont dues aux pratiques culturelles telles que le choix de la variété, la rotation, la fertilisation, le travail du sol, le désherbage mécanique. Il convient de les identifier et de voir leur impact sur le rendement.

2.1 Des variétés avec des potentiels de rendement et de qualité différents

Quelle que soit la culture, le choix de la variété influence le potentiel de rendement. La variété influence également la qualité du produit final. Pour le blé, de manière générale, il existe une relation linéaire moyenne négative entre le rendement et la teneur en protéine du grain. Toutefois à productivités égales, des différences importantes existent entre les variétés (Gate, 1995). Les résultats des essais variétés coordonnés par l'ITAB montrent bien que des variétés ont plus un profil pour produire des protéines (Renan, Saturnus, etc) alors que d'autres ont un profil pour faire du rendement (Rubisko, Diadem, Atlass, etc) (Figure 7). D'autres variétés ont un profil intermédiaire.

2.2 Une gestion de l'azote basée sur la rotation et les apports de fertilisants organiques

Pour leur développement, les cultures ont besoin de macro-éléments (carbone, hydrogène, oxygène, azote, phosphore, soufre, potassium, calcium, magnésium), et d'oligo-éléments (fer, manganèse, zinc, cuivre, bore, molybdène et chlore) (Soltner, 2000). Le carbone, l'hydrogène et l'oxygène sont fournis par l'air et l'eau. Les autres éléments sont prélevés par la plante dans le sol. La fertilité chimique du sol dépend du type de sol mais également des pratiques culturelles. Pour le blé tendre d'hiver biologique, l'azote a la plus grosse influence sur le rendement, c'est donc la plupart du temps le facteur limitant (Lampkin, 1999). Nous allons donc étudier seulement l'azote.

Figure 8: cinétique d'absorption de l'azote d'un blé tendre d'hiver en fonction de son précédent (source :Mangin et Cohan, 2013)

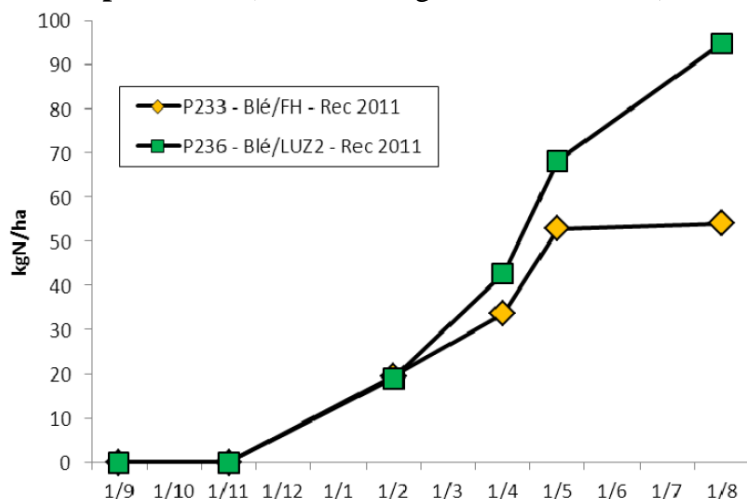


Figure 9 : simulation avec le logiciel STICS de l'apparition du stress azoté sur blé et épeautre en fonction du précédent (Source : Soulie, 2006)

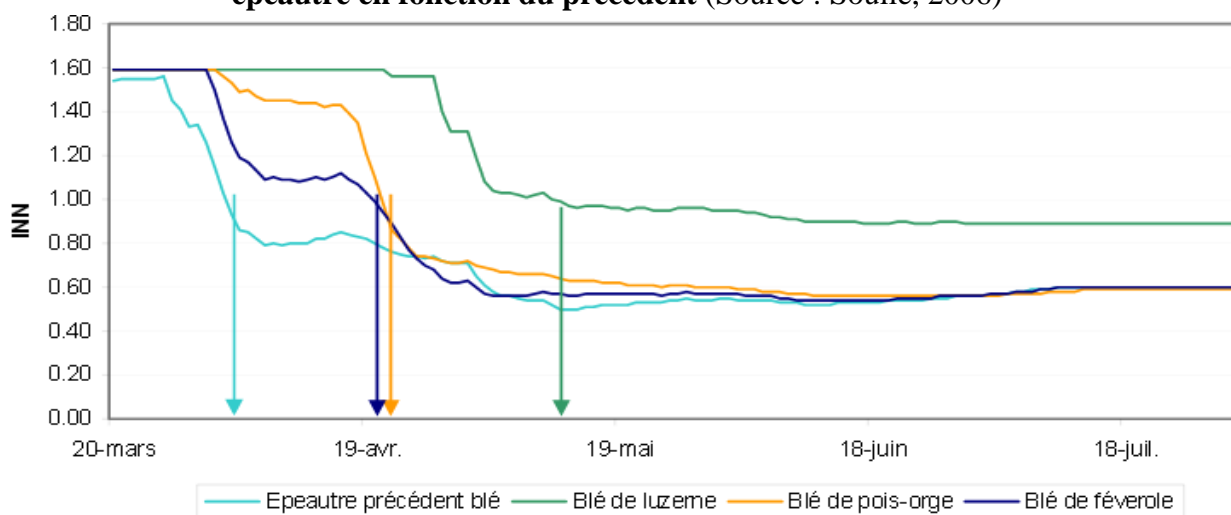


Tableau 1: valeur de minéralisation des résidus de culture de différents précédents (COMIFER, 2013)

Nature du précédent	Minéralisation des résidus de récolte (kgN/ha)	
	Ouverture du bilan en sortie hiver	Ouverture du bilan en avril
Céréale paille enfouie	- 20	- 10
Colza	20	10
Tournesol	-10	0
Lin fibre	0	0
Maïs grain	-10	0
Féverole	30	20
Pois / haricots de conserve	20	10
Luzerne (retournement fin été/début octobre) année n+1	40	30
Jachère de légumineuse, (moins de 1 ans, destruction fin été)	20	15

Plusieurs pratiques comme la rotation et notamment le précédent et l'apport d'engrais ou d'amendements organiques influencent l'état azoté de la parcelle.

2.2.1 *Le précédent : un point clé pour la gestion de la fertilisation azotée*

La rotation est très importante en AB, elle permet entre autres de contribuer à l'alimentation azotée du système de culture par l'intermédiaire des légumineuses qui fixent de l'azote atmosphérique grâce aux bactéries localisées dans les nodules racinaires. Cet azote fixé peut ensuite être valorisé par la dégradation des résidus de cultures riches en azote (David, 2009).

La fixation symbiotique des légumineuses et par conséquent, son arrière effet varient en fonction de la biomasse de la légumineuse produite et de la quantité d'azote présente dans le sol lors du cycle de la légumineuse (Cowell et al., 1989 ; Yang et al., 2010 ; Jensen et al., 2004). (Voisin et al. 2002) ont ainsi montré que la fixation symbiotique du pois s'arrête quand la concentration en nitrate atteint l'équivalent de 40 kg/ha dans l'horizon labouré et reprend dès que la concentration diminue.

Un dispositif en AB situé sur la station expérimentale d'Arvalis-Institut du Végétal de Boigneville (Essonne) a montré qu'un blé tendre d'hiver précédent luzerne absorbait 40 kg de N en plus qu'un blé tendre d'hiver précédent féverole (Figure 8). Le surplus d'absorption d'azote se fait principalement en fin de cycle. Ces résultats sont confirmés par la simulation, avec le modèle STICS¹ (Brisson et al., 1998), de l'apparition du stress azoté du blé en fonction de son précédent. Cette simulation a été réalisée dans le cadre des essais conduits sur le dispositif de La Motte sur la ferme de la Bergerie. Le stress azoté (caractérisé par l'indice de nutrition azoté) apparaît plus rapidement (environ 1 mois) sur le blé avec les précédents pois/orge et féverole qu'avec le précédent luzerne (Figure 9).

(Schneider et al., 2010) ont montré qu'un blé conduit en conventionnel précédent pois produit environ 8,4 q/ha de plus avec 20 à 30 kg de N/ha de moins qu'un blé précédent blé. Un essai longue durée en conventionnel de l'INRA de Clermont-Ferrand (Triboi et Triboi-Blondel, 2008) a montré que l'effet rémanent de la luzerne était de 202 kg de N/ha pour les 4 années suivantes de la luzerne. L'arrière effet de la luzerne était en moyenne de 83 kg de N/ha un an après la luzerne, de 47 kg de N/ha deux ans après, 48 kg de N/ha trois ans après, et 25 kg de N/ha quatre ans après la luzerne.

Dans la méthode des bilans azotée du COMIFER la minéralisation des résidus de la culture précédente correspond à un poste du bilan. Celle-ci diffère suivant les précédents : un précédent céréale avec des pailles enfouies engendre une organisation de l'azote minéral car les résidus de récolte ont un C/N élevés, il y a donc consommation d'azote (Tableau 1). A l'inverse, un précédent légumineuse libère de l'azote car les résidus ont un C/N bas. C'est le précédent luzerne qui libère le plus d'azote.

¹ Le modèle de culture sol-plante-atmosphère STICS est un modèle de fonctionnement des cultures à pas de temps journalier, développé par l'INRA depuis 1996. Il intègre les variabilités et la diversité de climat, de sol et les différentes pratiques culturales, et calcule des variables de rendement (quantité et qualité) mais aussi des processus physico-chimiques comme l'apparition du stress azoté.

Tableau 2: effet d'un apport d'engrais organique de 60 kg de N/ha au stade fin tallage
(source : Billy, 2008)

Dose	Rendement (q/ha) sur 58 situations	Groupe statistique	Taux de protéines sur 58 situations	Groupe statistique
0	42,74	B	10,48	B
60	48,36	A	10,90	A

2.2.2 Les engrais organiques : une source d'azote minérale disponible rapidement

Selon la normalisation, un engrais organique doit avoir pour l'élément qui le fait dénommer « engrais organique » au moins 3 % en masse par rapport à la matière sèche totale, dudit élément dans sa composition (Leclerc, 2001). Ces produits ont des caractéristiques différentes en termes de compositions en éléments nutritifs mais également en vitesse de minéralisation. Ils sont principalement utilisés pour leur effet azote car ils se minéralisent rapidement : de 60 % de N organique minéralisé/an pour la vinasse de la betterave jusqu'à 93 % de N organique minéralisé/an pour le Guano (Leclerc, 2009).

La Chambre d'Agriculture de Seine et Marne a réalisé durant 10 ans (1995 à 2005), 13 essais d'apports d'engrais organiques sur blé tendre d'hiver. Ces essais ont été réalisés sur les différents types de sol rencontrés dans la région (limon battant, limon argileux, limon calcaire) en comparant différents engrais organiques, différentes dates d'apport (automne, printemps) et différentes doses. Aucun des essais n'a montré de différence significative entre les produits utilisés, et ce, quelles que soient la date et la dose d'apport. Il y a cependant des tendances qui se dégagent dans certains cas. Les farines de plumes ont tendance à être plus efficaces que les fientes de volailles.

Ces essais montrent un effet significatif d'un apport d'engrais organique de 60 kg de N/ha au stade fin tallage sur le rendement et sur le taux de protéine (Tableau 2).

Cependant, l'efficacité des apports azotés était très variable d'un essai à l'autre. Il a été mis en évidence que les variations d'efficacité étaient dues :

- Aux conditions pédo-climatiques qui étaient plus ou moins favorables à la minéralisation.
- Aux reliquats sortie hiver (RSH) : plus le reliquat était élevé, plus l'efficacité était réduite
- A la présence d'adventices : plus les adventices étaient nombreuses, plus l'efficacité était réduite
- A la présence de ravageurs ou de maladies : plus les maladies/ravageurs étaient nombreuses, plus l'efficacité était réduite

Dans les cas où les apports d'engrais étaient efficaces, l'efficacité de l'apport a diminué avec l'augmentation de la dose. Cette variation d'efficacité des apports d'engrais organiques suivant la présence de facteur limitant est également soulevée par (David, 2004). La diminution d'efficacité avec l'augmentation de la dose est également observée avec par (Paponov et al, 1996; delogu et al., 1998 ; Giovanni et al., 2003).

Ces essais ont permis à la Chambre d'Agriculture de Seine et Marne de mettre au point un outil d'aide à la décision (OAD) pour la fertilisation azotée du blé tendre d'hiver au printemps. Cet outil vise à évaluer l'efficacité d'un apport d'engrais organique en prenant en compte les facteurs limitants qui sont le climat, la structure du sol, le peuplement et la présence d'adventices, de maladies et de ravageurs (Billy, 2008).

2.2.3 Les amendements organiques : de l'azote minéral disponible sur le long terme

Selon la normalisation, les amendements organiques sont des PRO qui ont moins de 3 % en masse d'un élément par rapport à la matière sèche totale, dudit élément dans sa composition (Leclerc, 2001). Les amendements organiques utilisés sur les fermes de références en grandes cultures biologiques sont le compost de déchets verts et le compost de fumier de cheval (Glachant, 2013). Le principal objectif des apports d'amendements organiques est l'entretien de la fertilité des sols grâce aux propriétés liées aux matières organiques (teneur en carbone, rétention d'eau, stabilité

Tableau 3 : effet d'un apport de compost de 15 à 20 t par rapport à un témoin non amendé (base 100) (source : Aubert et Papin, 2006)

Compost / Témoin		Rendements / ha		Protéines-riche %		Protéines-Sucre / ha		Peuplement / ha	
		Co/Te	N&K * 5%	Co/Te	N&K 5%	Co/Te	N&K 5%	Co/Te	N&K 5%
Années d'apport	1ère	99,0	A	98,8	C	97,8	C	102,7	A
	2ème	102,2	A	102,3	B	104,6	B	103,3	A
	3ème	103,4	A	106,1	A	109,6	A	105,2	A

* Test de Newman Keuls au seuil de 5%

Figure 10 : classement des cultures selon leur pouvoir de compétition vis-à-vis des adventives (avec ou sans binage) (source : Arino et al., 2012)

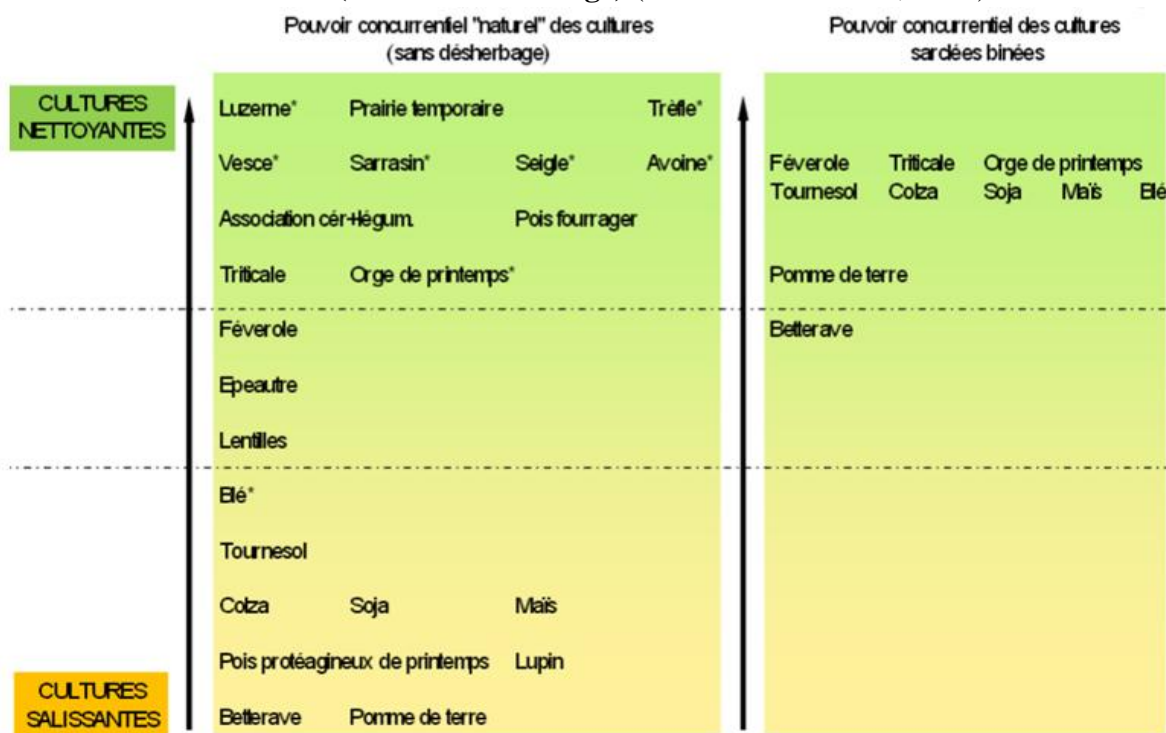


Figure 11 : illustration de différents pouvoirs couvrants de blé tendre d'hiver : photos prises à environ 2 m de la surface du sol (Renan à gauche, Caphorn à droite) (Laurent Poiret) (source : ITAB, 2012)



de la structure, etc) (Leclerc, 2009). Comme les engrais organiques, ils peuvent également apporter des éléments fertilisants à la culture mais en moindre quantité. L'azote met beaucoup plus de temps à se minéraliser que les engrais organiques. Par exemple, le compost de déchet vert ne minéralise que 5 % de N organiques/an. La vitesse de minéralisation de l'azote organique pour les fumiers est de 30 % de N organiques/an (Leclerc, 2009).

La chambre d'Agriculture de Seine et Marne a réalisé 7 essais sur les amendements organiques de 2004 à 2007 en agriculture conventionnelle et en AB. Ces essais ont été réalisés sur différents sols de la région Ile-de-France (limon battant, limon argileux et limon calcaire). Sur la plupart des critères (rendement, % protéines-richesse, protéines-sucre /ha, peuplement), après un effet très légèrement dépressif la première année, il semble y avoir une légère progression du rendement sur les trois années (Tableau 3). La variation de rendement et de peuplement dans le temps n'est pas significative. Cependant les apports ont un effet significatif d'une année sur l'autre pour les protéines.

2.3 Une gestion des adventices basée sur les leviers agronomiques et le désherbage mécanique

La gestion des adventices est un enjeu important en grandes cultures biologiques, elle passe par des moyens de lutte préventifs mais également des moyens curatifs comme le désherbage mécanique.

2.3.1 *La rotation : un point clé pour la maîtrise de l'enherbement*

La rotation est un élément majeur pour la maîtrise des adventices. Pour avoir une lutte optimale, la rotation doit

- alterner les cultures d'automne et les cultures de printemps pour casser les cycles des adventices.
- alterner les cultures annuelles et les cultures pluriannuelles
- alterner les cultures fortement couvrantes et les cultures faiblement couvrantes qui favorisent les adventices
- contenir des cultures avec des moyens de récolte différents (Lampkin, 1999)

La différence de pouvoir de compétition d'une culture vis-à-vis des adventices joue sur la population en adventices lors du cycle de la culture mais également sur la population en adventices des cultures suivante (Figure 10). Ainsi, un précédent luzerne ou trèfle sera optimal pour la lutte contre les adventices.

Il existe également des différences de pouvoir couvrant entre les variétés d'une même culture. Par exemple, la variété Renan est reconnue pour avoir une forte concurrence physique (Figure 11).

2.3.2 *Le labour et le déchaumage*

Le travail du sol est également indispensable pour lutter contre les adventices. Les objectifs sont différents suivant les interventions culturales.

Le déchaumage qui a lieu après la récolte va détruire les repousses du précédent et les adventices. Il va également faire germer un certain nombre de graines, en vue de les détruire par la suite par d'autres passages. Enfin, il participe à l'épuisement des vivaces en tentant de faire remonter les rhizomes à la surface en période sèche.

Le labour enfouit les repousses non détruites et les graines d'adventices qui n'ont pas levé, quelques graines enfouies perdront ainsi leur capacité germinative (ITAB., 2005). (Peigné et al., 2008 ; Peigné et al., 2012) mettent en évidence que le sans labour est possible en AB mais plus

Figure 12 : densité de vulpins/m² sur céréale en fonction de la date de semis (source : Rodriguez, 2010)

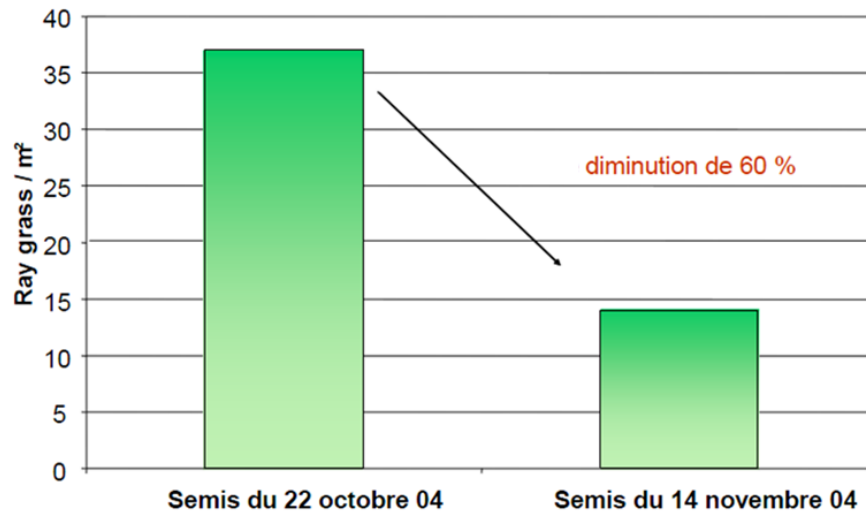


Figure 13: facteurs influençant l'efficacité du désherbage mécanique (source : ITAB, 2005)

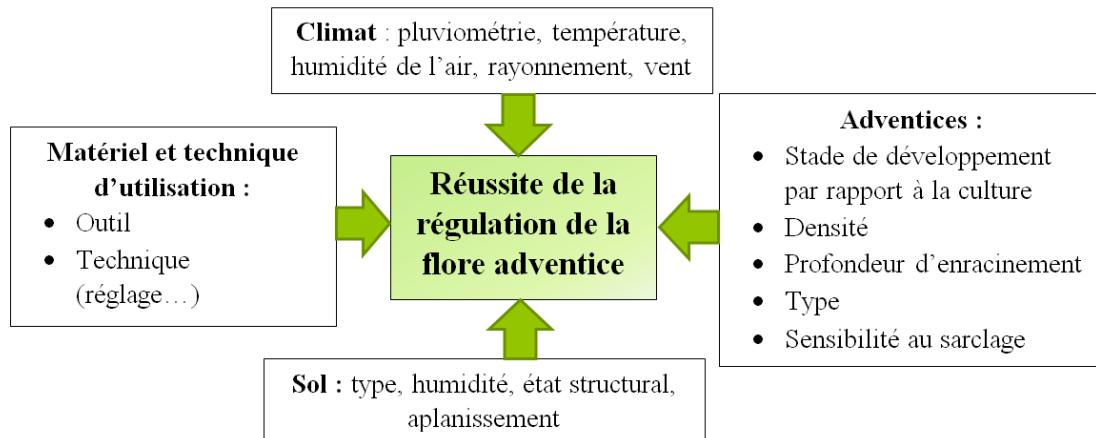
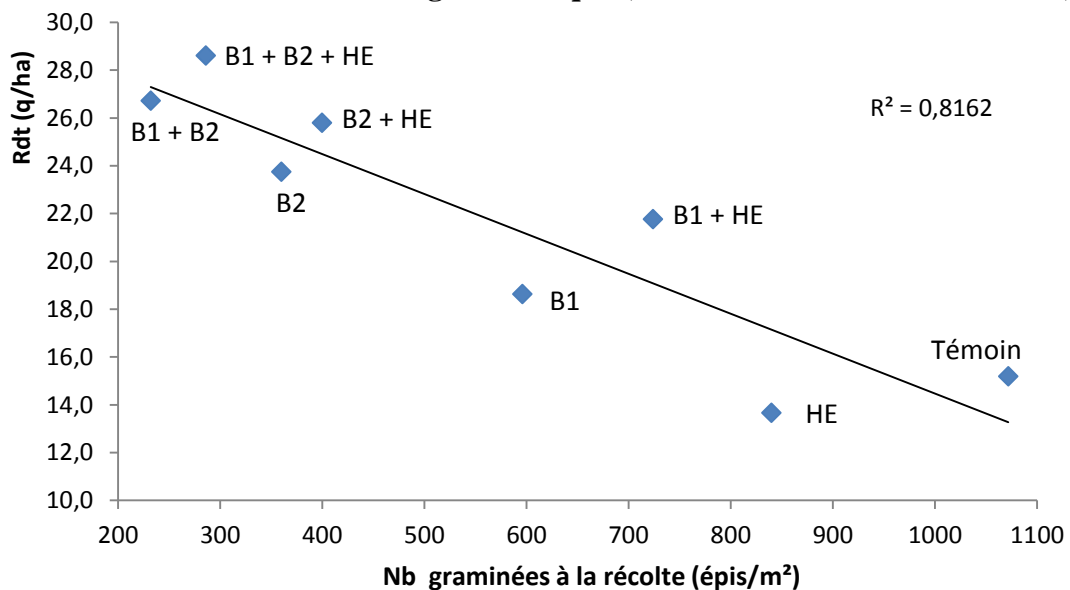


Figure 14 : rendement d'un blé tendre d'hiver en fonction du nombre d'épis de graminées et de différente modalité de désherbage mécanique (source : Glachant et Aubert, 2011)



risqué. De nombreux événements peuvent causer un décrochage de cette technique en terme d'infestation en adventices : accident du aux ravageurs, à la mauvaise gestion de la rotation et à des conditions climatiques atypiques et défavorables, etc

La technique du faux semis est très utilisée en AB, elle consiste à préparer un lit de semence aussi finement que pour un vrai semis afin de favoriser la germination des adventices. Les plantules sont ensuite détruites de façon très superficielle pour ne pas remettre des graines en conditions de germination. Cette technique permet de diminuer le stock semencier de la parcelle.

2.3.3 Les modalités de semis à ne pas négliger

La date de semis est également importante, un semis d'automne précoce favorisera la levée d'adventices et permettra un passage de herse étrille avant l'hiver sous réserve de conditions climatiques adaptées (ITAB, 2005). A l'inverse, un semis tardif favorisera le développement de la culture avec peu d'adventices mais il sera impossible d'effectuer un désherbage mécanique avant l'hiver (Figure 12).

La densité de semis a également sont importance. Elles sont généralement augmentées de 10 à 20% en AB par rapport à l'objectif de peuplement fixé en agriculture conventionnelle. Cette augmentation vise à augmenter la capacité à concurrencer physiquement les adventices et à prendre en compte la perte de plants lors du désherbage mécanique (ITAB, 2005). Enfin une profondeur de semis constante favorise une levée homogène. Ce critère est important pour les passages de désherbage mécanique qui doivent être effectués à des stades bien précis (ITAB, 2005).

2.3.4 La gestion curative des adventices par le désherbage mécanique

Il existe plusieurs outils de désherbage mécanique, l'efficacité de ces derniers est fonction de plusieurs facteurs (Figure 13). Différents modes d'action existent suivant les outils: l'arrachage, le sectionnement des racines, le recouvrement de la plantule et l'épuisement des adventices. Les outils utilisés sur le réseau de fermes de références sont la herse étrille, la houe rotative, la bineuse et l'écimeuse (Glachant, 2013).

La herse étrille est un outil polyvalent travaillant toute la surface du sol. Il est important de ne pas l'utiliser trop tôt pour ne pas endommager la culture et pas trop tard pour avoir une bonne efficacité sur les mauvaises herbes (ITAB, 2005). La houe rotative aussi appelée écrouteuse s'utilise sur des adventices très jeunes (cotylédons ou filaments blancs) sur toute la surface du sol. La houe rotative est très complémentaire de la herse étrille en terres limono-battantes. Elle permet d'éclater la croûte de battance avant de passer avec la herse étrille. La bineuse travaille sur l'inter-rang, elle doit être utilisée à un stade plus tardif que la herse étrille (ITAB, 2005). L'écimeuse consiste à faucher les adventices au dessus de la culture avant qu'elles montent à graine.

Un essai de désherbage mécanique conduit par la Chambre d'Agriculture de Seine-et-Marne montre une relation linéaire entre le rendement et le nombre d'épis de graminée par m² (Figure 14). Il met également en évidence l'impact de différentes modalités de désherbage mécanique sur le nombre d'épis de graminée par m² (Glachant et Aubert, 2011). Ainsi, deux passages de binage ont permis de réduire le nombre d'épis/m² de 900 et d'augmenter le rendement de 11 q/ha par rapport au témoin sans désherbage. Cela montre l'importance du désherbage mécanique, cependant cet essai a été réalisé sur des populations très importantes de graminée.

2.3.5 *Raisonner la fertilisation azotée*

L'apport d'azote par les engrais et amendements organiques bénéficie à la culture en place mais également aux adventices. Ainsi une trop forte fertilisation peut engendrer un développement important des adventices qui sera plus difficile à contenir que si la fertilisation est faible ou nulle. (Barberi, 2002) a montré que la fertilisation à l'aide d'amendements organiques était moins propice au développement d'adventices que la fertilisation à l'aide d'engrais organiques. Cela est dû à la vitesse de minéralisation des produits qui est plus lente pour les amendements organiques, l'azote est donc mieux valorisé par la culture. Il faut donc trouver le bon équilibre en fertilisation azotée et risque de développement des adventices.

2.4 La gestion des ravageurs et des maladies

En AB, la lutte contre les maladies et les ravageurs se fait essentiellement par des méthodes préventives car les méthodes curatives ont une efficacité limitée. Compte tenu des rotations pratiquées en AB et de la faible disponibilité en azote, les blés tendres d'hiver ont rarement des problèmes importants concernant les maladies et les ravageurs. Les maladies les plus présentes sur blé sont la carie du blé, l'ergot et la rouille jaune (Lampkin, 1999).

2.4.1 *Les actions sur le système de culture*

Pour limiter le développement des maladies et des ravageurs, il est préconisé d'avoir une rotation diversifiée avec des cultures de familles différentes. Cette rotation doit respecter le délai de retour de chaque culture (3 ans pour le blé). Le blé ne doit pas représenter plus de 30% de la rotation (Lampkin, 1999). Un autre élément à prendre en compte est la gestion des résidus de récolte qu'il est préférable de broyer et d'enterrer car ils peuvent constituer un support d'agents pathogènes. Il est également possible de jouer sur la date de semis et sur l'association de cultures. Il faut également tenir compte du sol de la parcelle, des ravageurs sont plus ou moins présents dans certains types de sol (Lampkin, 1999).

2.4.2 *Les actions phytotechniques*

Le choix de variétés tolérantes ou résistantes aux agents pathogènes est primordial, c'est l'élément le plus important après la rotation. L'utilisation de semences certifiées au profit des semences de ferme est un moyen d'éviter la contamination ou la multiplication de certaines maladies comme la carie et l'ergot. La fertilisation doit être équilibrée, la carence en oligo-éléments peut favoriser l'attaque de champignons et de ravageurs. Enfin, les auxiliaires jouent un rôle important dans la protection des cultures (Lampkin, 1999).

2.4.3 *Des méthodes curatives peu efficaces*

Il existe quelques moyens de lutte curatifs en grandes cultures biologiques avec notamment certains produits d'origine naturelle (pyréthre, cuivre, soufre) qui sont autorisés. Ils agissent de façon plus ou moins efficace sur certains insectes nuisibles ou certaines maladies. Toutefois, ces produits ne sont pas sélectifs, ils éliminent donc également les populations d'auxiliaires qui jouent un rôle important en AB.

3) La problématique

Les parties précédentes ont permis de mettre en évidence une influence des conditions pédoclimatiques et de différentes pratiques sur le rendement. L'objectif du stage est d'étudier l'impact de ces différents facteurs dans l'élaboration du rendement et d'identifier les bonnes pratiques culturales. Ainsi la problématique est la suivante :

Quel est la hiérarchisation des facteurs intervenant dans l'élaboration des rendements observés en blé tendre d'hiver en système de grandes cultures biologique d'Ile-de-France et peut-on quantifier l'impact des pratiques culturales sur le rendement.

Ainsi plusieurs questions se posent :

Quel est le poids du type de sol et de l'année dans l'élaboration du rendement.

Quel est le poids du précédent dans l'élaboration du rendement. Peut-on quantifier l'impact du précédent sur le rendement ? Quel précédent obtient les meilleurs rendements ?

Quel est le poids de la fertilisation azotée dans l'élaboration du rendement. Peut-on quantifier l'impact de la fertilisation azotée sur le rendement ? La fertilisation azotée permet elle d'augmenter le rendement dans tous les cas ?

Quel est le poids de la variété dans l'élaboration du rendement. Peut-on quantifier l'impact de la variété sur le rendement ?

Quel est le poids de la date de semis dans l'élaboration du rendement. Peut-on quantifier l'impact de la date de semis sur le rendement ? Y a-t-il une date de semis à privilégier pour obtenir des meilleurs rendements ?

Quel est le poids du travail du sol dans l'élaboration du rendement. Peut-on quantifier l'impact du travail du sol sur le rendement ? Le sans labour permet t-il d'obtenir des rendements comparables au labour ?

Quel est le poids du désherbage mécanique dans l'élaboration du rendement. Peut-on quantifier l'impact du désherbage mécanique sur le rendement ? Des passages importants de désherbage mécanique et le binage permettent-ils d'obtenir des meilleurs rendements ? Le nombre de désherbage mécanique augment-il avec la fertilisation azotée ?

Les réponses à ces questions ont pour but d'orienter le conseil technique auprès des agriculteurs en termes de pratique de désherbage, de fertilisation, de précédent, de travail du sol, de date de semis, de choix de variété.

Figure 15: répartition géographique des 12 fermes de références en grandes cultures biologiques d'Ile-de-France

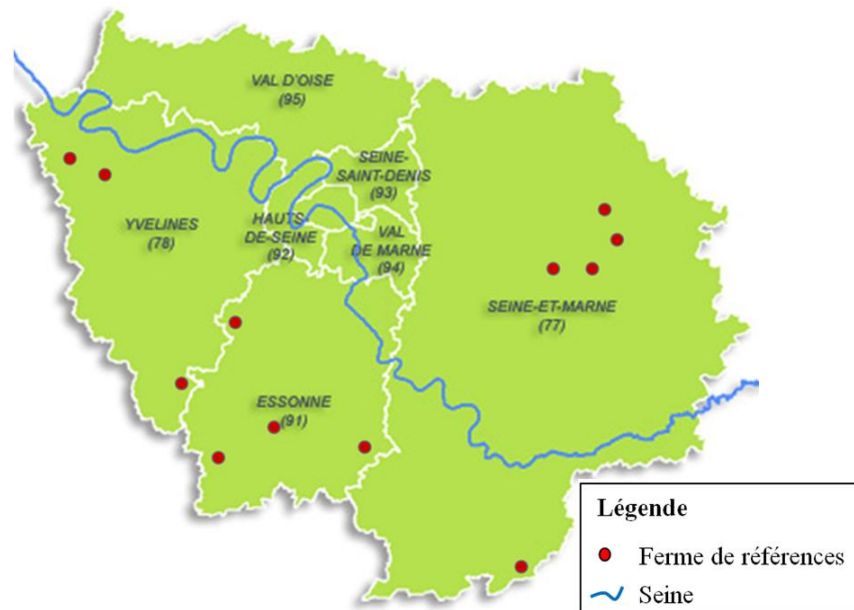
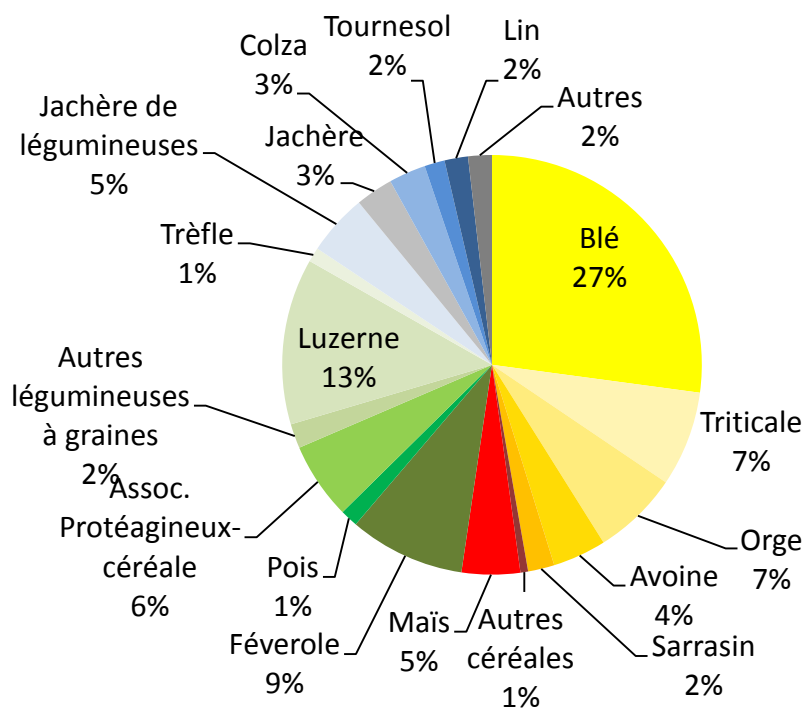


Figure 16: assolement des fermes de références de 2003 à 2013 (conversion et AB)



II. MATERIEL ET METHODE

Le matériel utilisé est le réseau de fermes de références mis en place par la Chambre d'Agriculture de Seine-et-Marne. Dans la suite du rapport, il sera appelé tout simplement « réseau ». Un certain nombre d'étapes ont été nécessaires avant l'analyse des données. Il a fallu récolter les données d'itinéraires techniques auprès des agriculteurs du réseau puis identifier le type de sol de chaque parcelle, caractériser les années étudiées, choisir les méthodes d'analyse et enfin mettre en forme les données.

1) Le suivi du réseau de fermes de références en grandes cultures biologiques d'Ile-de-France

Le réseau a été initialisé en 2003. Il a été créé pour produire des références technico économiques, en réalisant des calculs de marge à l'exploitation et à la culture, avec une collecte à la parcelle qui permet de faire un inventaire des pratiques culturales. C'est dans ce cadre que ce réseau a été utilisé lors du stage.

1.1 Un réseau représentatif des exploitations de grandes cultures biologiques d'Ile-de-France

Ce réseau comprenait 6 exploitations en 2003 et a été élargi à 12 exploitations en 2011 afin de prendre en compte des exploitations nouvellement converties (en 2009 et 2010) et d'améliorer la représentativité du réseau vis-à-vis des systèmes rencontrés en Ile-de-France. Les exploitations du réseau ont été choisies pour leur représentativité de la diversité des systèmes de grandes cultures biologiques franciliens en termes de situation géographique de type de sol et de rotation (Figure 15). Ces exploitations sont toutes sans élevage, l'une d'entre elles possède un atelier d'arboriculture. Elles sont toutes converties en totalité à l'agriculture biologique sauf deux d'entre elles qui sont mixtes avec 56 ha et 59 ha en AB. La surface des autres exploitations entièrement en AB varie de 100 ha à 195 ha avec une moyenne de 169 ha. Le réseau comporte 1 631 ha conduits en AB (272 parcelles) soit 23% de la surface conduite en grandes cultures biologiques en Ile-de-France (Glachant, 2013).

L'assolement des fermes de références est très proche de l'assolement régional (Figure 2 et Figure 16). De plus, les rotations présentes sur le réseau sont représentatives de la diversité des rotations pratiquées en Ile-de-France (avec et sans luzerne, etc) (Glachant, 2013).

La représentativité du réseau des exploitations de grandes cultures biologiques se confirme grâce aux rendements obtenus sur le réseau et ceux obtenus sur l'ensemble de la région Ile-de-France (Figure 17). Les moyennes et les variations de rendement obtenues sur le réseau sont très proches de celles observées à l'échelle de l'Ile-de-France. Ce constat est le même pour les autres cultures (Glachant, 2013).

1.2 L'enquête sur les données technique réalisées sur le réseau de fermes de références

L'enquête a pour objectif de collecter l'itinéraire technique et le rendement (également le taux de protéine pour le blé) à la parcelle afin de réaliser une étude technique de chaque culture. L'enquête relève également le prix d'achat des intrants, le prix de vente des cultures et les outils utilisés afin de calculer les marges brutes et nettes à l'échelle des cultures et des exploitations. Dans le cadre du stage, seules les données techniques nous concernent. Nous allons donc seulement détailler ces données collectées.

L'enquête a débuté en 2003. Elle consistait à relever pour chaque parcelle les opérations de semis (culture, variété), le rendement et le taux en protéine pour le blé. Au fil des années, des données supplémentaires ont été recueillies (Tableau 4). A partir de 2005, les opérations de

Figure 17 : rendements moyens 2005-2011 en blé biologique (bio + conversion) sur le réseau de fermes de références et sur l'ensemble de la région Ile-de-France (source : Glachant, 2013)

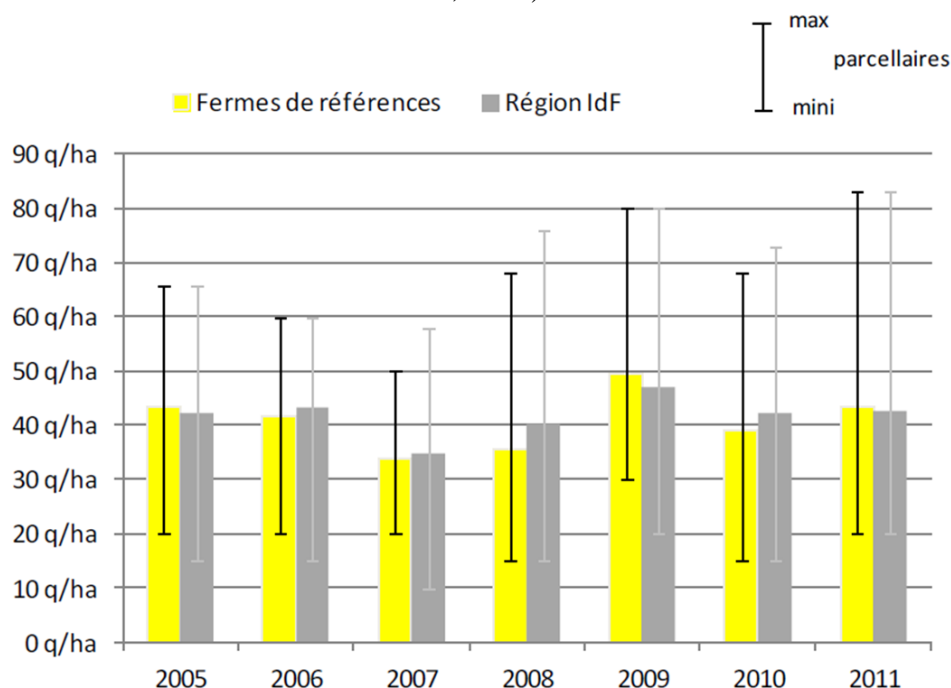


Tableau 4 : données relevées sur le réseau de fermes de références selon les années

Données		2003	2004	2005 à 2010	2011 à 2013
Rendement					
Taux protéine blé					
Semis	Culture				
	Variété				
	Type de semence		Blé		
	Dose		Blé		
	Date		Blé		
	Outil				
Fertilisation	Produit		Blé		
	Dose		Blé		
	Date		Blé		
Désherbage mécanique	Outil		Blé		
	Date		Blé		
Travail du sol	Outil				
	Date				
Implantation CIPAN	Culture				
	Dose				
	Date				
	Outil				
Destruction CIPAN	Date				
	Outil				

Case en Vert : les données ont été récoltées chez l'ensemble des agriculteurs

Case en Orange : les données ont été récoltées chez certains agriculteurs

Case blanche : les données n'ont pas été collectées

Case avec « Blé » : seulement les données sur le blé ont été collectées

désherbage mécanique et de fertilisation ont été collectées. A partir de 2011, les opérations de travail du sol et celles liées au CIPAN ont été relevées. De 2003 à 2010, des données supplémentaires ont été ponctuellement collectées chez certains agriculteurs par l'intermédiaire d'autres études spécifiques (désherbage mécanique, fertilisation, travail du sol).

Les données des années 2003 à 2011 ont été collectées avant le stage, celles de 2012 et 2013 ont été collectées en début de stage par une visite chez les agriculteurs. Certaines données sont manquantes (notamment le taux en protéine). Les données collectées sont évaluées à dire d'agriculteur. Ainsi, le rendement est connu de 2 à 5 q/ha près.

1.3 La base de données

Les données collectées sont saisies dans une base de données Access. Cette base de données permet de centraliser toutes les données, aussi bien techniques qu'économiques, concernant le réseau de fermes de références. Les données techniques sont entrées à l'échelle d'un « emblavement » qui correspond à une culture, sur une parcelle une année donnée. On peut donc avoir plusieurs emblavements sur une même parcelle, la même année si la parcelle reçoit plusieurs cultures. Dans l'étude, c'est l'emblavement qui constitue l'individu statistique. Chaque parcelle est reliée à un agriculteur. Chaque opération est reliée à un emblavement. Chaque opération est reliée à un outil et à un intrant et une dose dans le cas des opérations de fertilisation et de semis. Ainsi à l'aide de requêtes, cette base de données permet d'extraire des fichiers Excel directement analysables par un logiciel statistique.

2) **Caractérisation des situations pédoclimatiques**

Compte tenu de l'impact du type de sol et de l'année climatique sur le rendement, il est nécessaire de caractériser les types de sol de chaque parcelle et les années utilisées pour étudier l'impact des pratiques culturales sur le rendement.

2.1 Collecte des données sur les sols et identification des types de sols

Une enquête a été réalisée auprès des agriculteurs pour caractériser le type de sol de chaque parcelle. Ce travail d'enquête évite de réaliser un profil de sol ce qui aurait été impossible dans le temps disponible. Elle permet également d'être plus précis qu'en demandant simplement le sol à l'agriculteur. Elle a été faite sur seulement 9 agriculteurs car elle avait déjà été effectuée sur 3 exploitations du réseau. Une fois les données collectées, nous avons identifié le type de sol de chaque parcelle. L'identification des sols a été réalisée à l'aide de la classification agronomique et comportementale des sols de Seine-et-Marne. Cette dernière regroupe l'ensemble des sols présents en Ile-de-France.

2.1.1 *La classification agronomique et comportementale des sols de Seine-et-Marne*

La classification des sols comptabilise 14 classes (limons francs, limons battants assez sains, limons battants engorgés, limon argileux vrais, limons argileux, limons argileux engorgés, argiles limoneuses, argiles engorgées, argilo-calcaires, limons calcaires, sables calcaires, sables sains, sables argileux et sables limoneux) et 42 sous classes de sols (Aubert et al., 2005). Les sous classes sont déterminées selon la texture, la profondeur, la présence de battance, d'engorgement en eau l'hiver, la nature du sous sol et l'état carbonaté du sol. Dans la classification :

- chaque sous classe de sol est détaillée suivant ses caractéristiques agronomiques (physico-chimique, régime hydrique, potentiel de rendement, etc) et suivant les recommandations en terme de conservation des sols, de travail du sol et de fertilisation.

Figure 18: diagramme du comportement des types de sol de la classification des sols de Seine-et-Marne en fonction du flétrissement des cultures, de la reprise en bonne condition au printemps et de la présence de système drainage (source : Aubert et al., 2005)

	Drainage	Flétrissement des cultures					
		Jamais	Cultures d'été Au moins 3-4 / 10 ans	Cultures ptps ptps 3-4/10 et été 6-7/10 ans	ptps-été secs soit 3-4/10 ans	Cultures hiver ptps-été secs ou normaux 6-7/10 ans	Au moins 9 / 10 ans
100 % des reprises en bonnes conditions au printemps	Même les hivers pluvieux (au moins 9 années sur 10)	NON	LFtp LBtp LAV LCp	LFsp LCsp/c		LCpp SSs SCs	ACsup
		OUI					
	Les hivers peu pluvieux ou normaux (6 à 7 années sur 10)	NON		LBsp LAsp SA		ACpp LBpp	SSI
		OUI	LBp LAp	AL ^{Ca} sp/c AL ^{Ca} sp/a LBEsp	LCsp/a ACsp		
Seulement les hivers peu pluvieux (3 à 4 années sur 10)	NON		ALsp/c	ALpp	AL ^{Ca} pp SCe		
	OUI	LAEsp	ALsp/a ASp SLe	LBEpp AE ^{Ca} pp AEpp			
Jamais même les hivers peu pluvieux (au plus 1 an sur 10)	OUI mais inefficace		LSe	LAEpp		AE ^{Ca} sup AEsup ASsup	

LF Limons francs	AE Argiles engorgées
LB Limons battants assez sains	AC Argilo-calcaires
LBE Limons battants engorgés	LC Limons calcaires
LAV Limons argileux vrais	SC Sables calcaires
LA Limons argileux	SS Sables sains
LAE Limons argileux engorgés	SA & AS Sables argileux & Argiles sableuses
AL Argiles limoneuses	SL & LS Sables limoneux & Limon sableux

AL^{Ca} ou AE^{Ca} Légèrement carbonaté	tp très profond	
e engorgé	p profond	/c sur fond calcaire
l limoneux	sp semi-profond	/a sur fond d'argile
s sain	pp peu profond	
	sup superficiel	

- les sous classes de sols sont placées sur un diagramme en fonction de l'aptitude du sol à une reprise de travail en bonnes conditions au printemps, de la sensibilité des cultures à un stress hydrique et de la présence de système de drainage (Figure 18).

2.1.2 L'enquête sur les types de sols

Le questionnaire d'enquête a été mis en place pour caractériser les sols suivant la classification agronomique et comportementale des sols de Seine-et-Marne. Nous allons détailler ce questionnaire d'enquête afin de mettre en évidence les informations qu'apportent chacune des questions. Le questionnaire ainsi que les définitions des termes techniques utilisés dans le questionnaire sont présentés en Annexe 1. La succession des grands types d'informations collectées sur le sol permettent de cerner au fur et à mesure le type de sol concerné.

- Informations générales sur le sol :

Tout d'abord, des informations générales sur la parcelle étaient demandées telles que la situation topographique, l'altitude, la pente, la pierrosité ou la présence d'un système d'irrigation.

- Comportement hydrique du sol :

Ensuite, d'autres aspects ont été absorbés comme la présence de système de drainage, la nature du sous sol, l'efficacité du drainage du sol (avec ou sans drain), la nécessité d'irrigation (avec ou sans système d'irrigation), la présence de battance, de fleurissement de surface, le délai de ressuyage après les grandes pluies d'hiver, le temps de travail du sol en bonne condition. Il a été également demandé si le sol était sain ou pas et dans ce cas de faible ou forte hydromorphie :

- la présence de battance et de fleurissement donnent une information sur la texture du sol
- la présence d'hydromorphie, le critère « sain », l'efficacité du drainage, le délai de ressuyage et le temps de travail en bonne condition renseignent sur le comportement hydrique du sous-sol, la texture et la profondeur du sol.
- la présence de système de drainage donne une indication sur le comportement hydrique du sous sol (perméabilité) et sur la profondeur du sol (en lien avec l'hydromorphie).

- Comportement des cultures et du travail du sol selon la climatologie de l'année :

Une question sur le flétrissement des cultures et sur la reprise du sol en bonne condition au printemps était demandée. Ces deux questions sont essentielles dans l'identification. La capacité de bonnes reprises de sol au printemps selon les années climatiques nous donne des informations sur la texture, la perméabilité du sous sol et la profondeur du sol. Le flétrissement des cultures renseigne sur la profondeur d'enracinement des cultures. Celle-ci n'était pas demandée directement aux agriculteurs car ces derniers ont rarement une idée précise de la profondeur de leur sol.

- Système de cultures pratiqué

Ensuite des informations sur le système de cultures (régularité du labour, type de culture, durée de la rotation, présence historique de prairie) ont été relevées. Chaque type de sol a un taux de matière organique moyen qui varie suivant le système de culture. Celui-ci sera plus élevé que la moyenne en système polyculture élevage, alors qu'il sera plus faible dans le cas de présence importante de cultures industrielles comme la pomme de terre ou la betterave.

- Potentiel de rendements des cultures :

Enfin, le potentiel de rendement en conventionnel et en bio (sans irrigation) en blé, en cultures de printemps (orge, Pois, féverole) et en culture d'été (maïs) ont été demandés. Le potentiel de

Figure 19: schéma de la méthodologie utilisée pour l'identification des sols

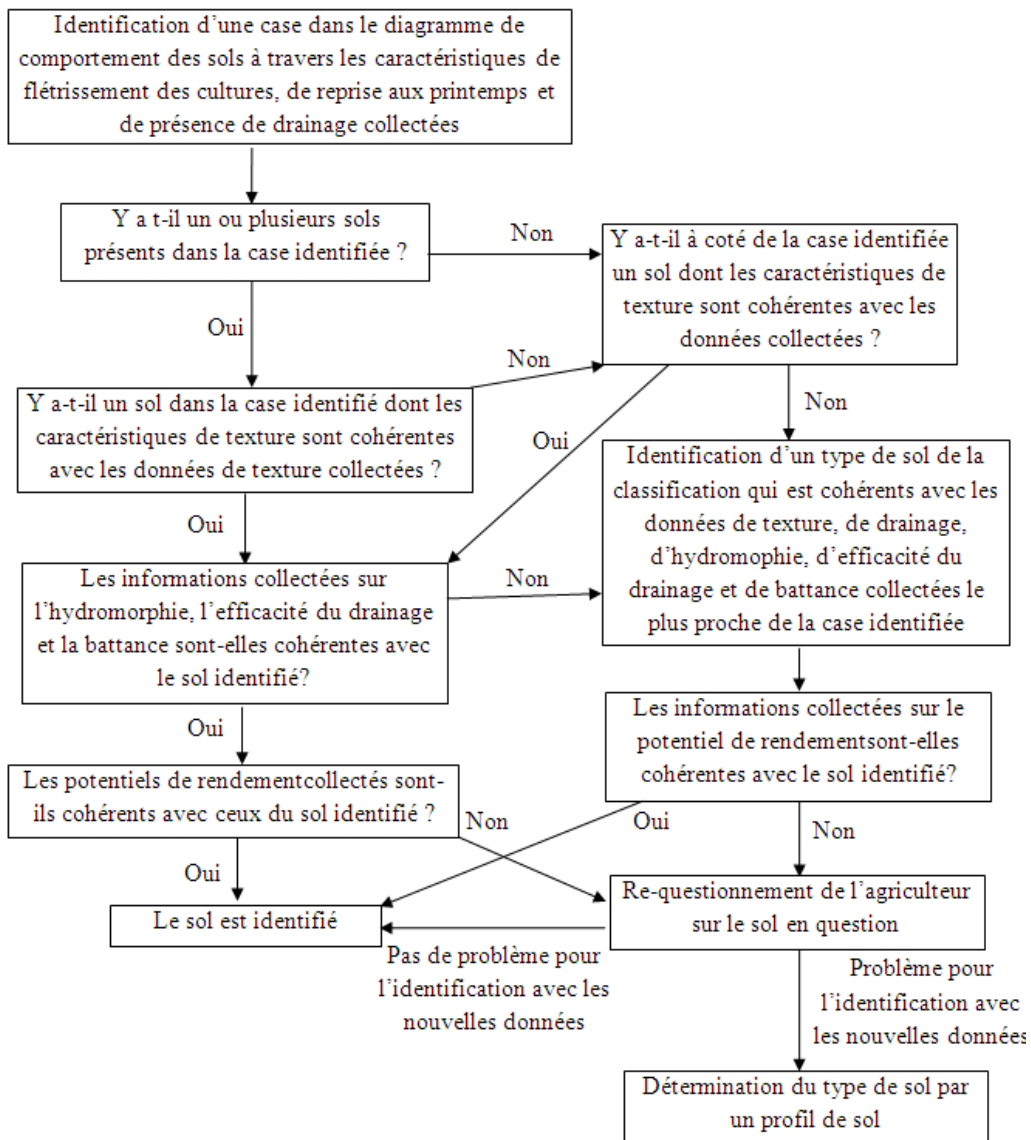
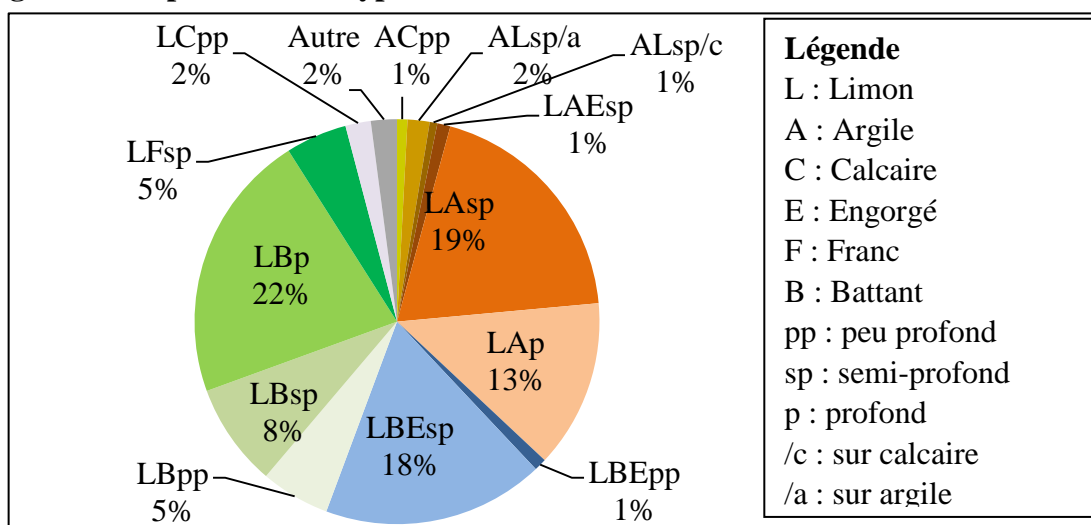


Figure 20 : répartition des types de sol sur le réseau en fonction de leur surface



Les sols d'une parcelle correspondent aux sols majoritaires en termes de surface. La totalité de la surface de la parcelle a été attribué à ce sol.

rendement est un bon indicateur du comportement global du sol : il permet de confirmer ou de sélectionner un des types de sols déterminés au travers des caractéristiques précédentes.

Lors de l'enquête, nous avons veillé à la cohérence entre les différentes réponses données. Par exemple, un sol sain n'est jamais hydromorphe, un sol très hydromorphe ne se reprend pas bien tous les printemps ou n'a pas un potentiel de rendement de 90 q/ha en blé conventionnel. Si les réponses n'étaient pas cohérentes, la question était reposée à l'agriculteur avec d'éventuelles précisions sur le sens de la question. En effet, certaines questions peuvent être interprétées différemment suivant les agriculteurs, il a donc fallu être bien clair sur le sens des questions.

2.1.3 La méthodologie d'identification des types de sols

L'identification des types de sol a été réalisée en collaboration avec Claude Aubert, conseiller en AB à la Chambre d'Agriculture de Seine-et-Marne et co-auteur de la classification agronomique et comportementale des sols de Seine-et-Marne. Elle a été réalisée à l'aide des données d'enquêtes et d'analyses de sols. Dans le cas où ces données ne nous permettaient pas d'identifier le sol, nous avons effectué un profil de sol. Le schéma de la figure 19 présente la méthodologie mise en place pour l'identification des sols.

Pour les parcelles hétérogènes, plusieurs types de sol ont été déterminés en relevant la surface de chaque type de sol. C'est le type de sol majoritaire en termes de surface qui a été retenue dans le cadre de l'étude.

2.1.4 Résultat de l'identification des sols du réseau

Le réseau de fermes de références comporte 20 types de sols de la classification agronomique et comportementale des sols de Seine-et-Marne (Figure 20). Les sols limoneux représentent 95 % des types de sol, les sols argileux 4 % et les sols sableux 1%. Les sols les plus représentés sont les limons battants profonds (LBp), les limons battants semi-profonds (LBsp), les limons battants engorgés semi-profonds (LAEsp), les limons argileux profonds (LAP) et les limons argileux semi-profonds (LAsp) qui représentent à eux seul 80 % des sols en termes de surface. Quelques caractéristiques généraux (taux d'argiles, CEC, potentiel de rendement) des sols du réseau sont présents en annexe 2.

2.1.5 Regroupement des sols par 7 grands types de sols

Pour l'analyse des données, les sols ont été regroupés selon une classification réduite à sept grandes classes établies par la classification agronomique et comportementale des sols de Seine-et-Marne (Annexe 2). Les sept classes se basent sur le potentiel de rendement et le comportement hydrique des sols. Elles correspondent aux sols : profonds, intermédiaires séchants, séchants, très séchants, intermédiaires humides, humides et très humides. Les sols profonds, intermédiaires séchants et intermédiaires humides représentent à eux trois 86 % des types de sols du réseau (Figure 21). Les sols très humides et très séchants sont très peu représentés.

Le potentiel de rendement en blé conventionnel non irrigué des sols du réseau sont de :

- 80 à plus de 100 q/ha pour les sols profonds
- 60 q/ha à 100 q/ha pour les sols intermédiaires humides et intermédiaires séchants.
- 40 q/ha à 100 q/ha pour les sols humides
- 40 q/ha à 80 q/ha pour les sols séchants
- 40 q/ha à 60 q/ha pour les sols très séchants et très humides.

Figure 21 : répartition des types de sols sur le réseau de ferme de référence en fonction de leur surface selon la classification à 7 classes

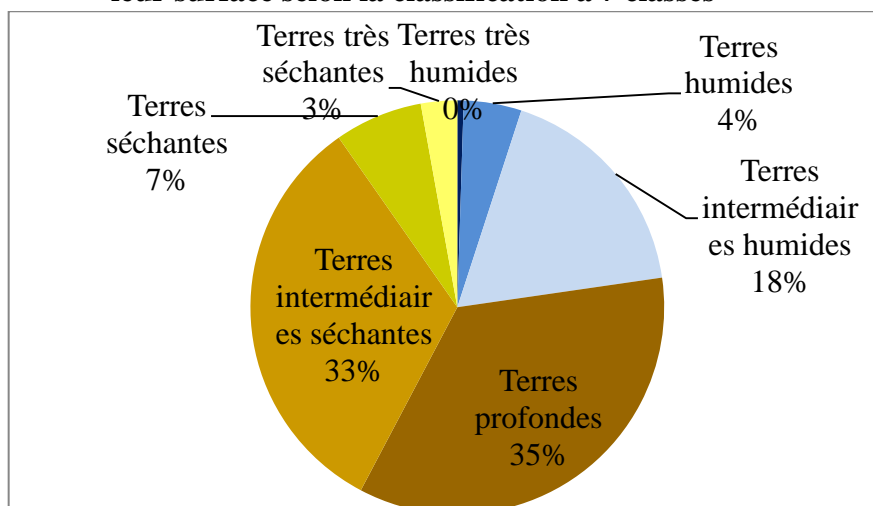


Figure 22 : pluviométrie hivernale (octobre à mars) de la station de Melun-Villaroche des années étudiées et de la normale (1980-2010).

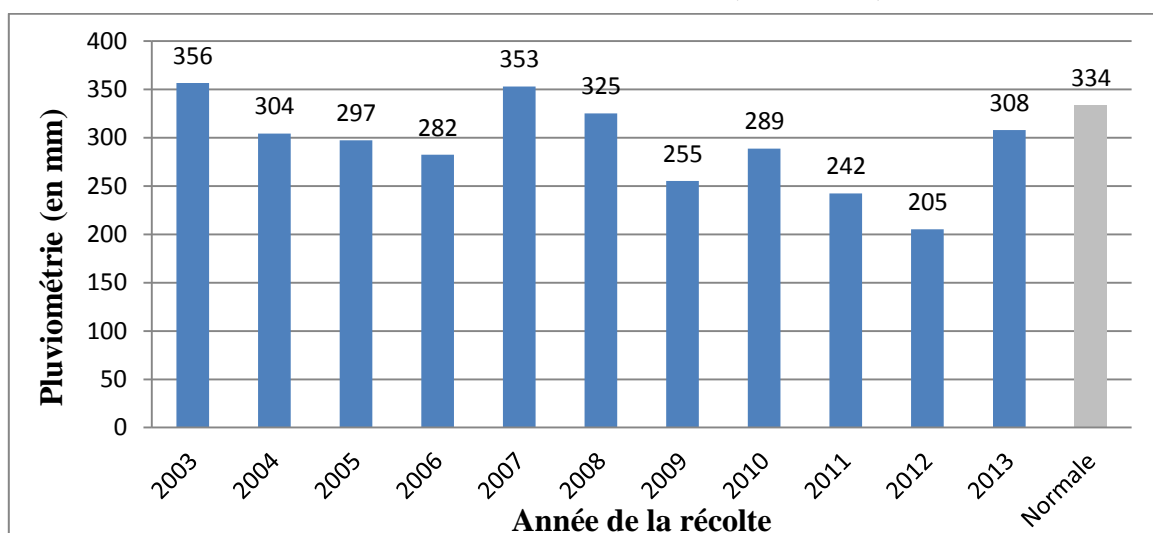
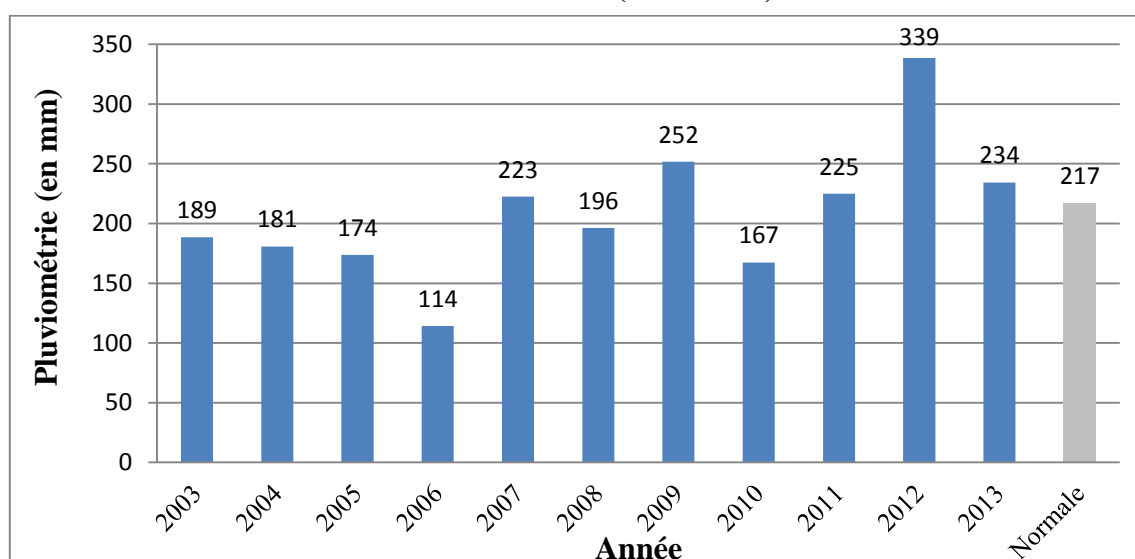


Figure 23 : pluviométrie printanière de la station de Melun-Villaroche des années étudiées et de la normale (1980-2010)



Les rendements en sols à tendance séchant sont particulièrement sensibles aux faibles précipitations (notamment printanières). A l'inverse, les rendements en sols à tendance humide sont particulièrement sensibles aux fortes précipitations (notamment hivernales). Ces classes permettent donc de regrouper des sols qui ont le même potentiel de rendement et comportement hydrique selon le type d'année climatique.

2.2 Caractérisation des années climatiques

L'étude est réalisée sur 10 ans. Il est donc nécessaire de caractériser ces années pour expliquer les rendements obtenus. Nous avons réalisée une classification des années afin de les regrouper pour simplifier l'interprétation des résultats. Dans le cadre de l'étude nous recherchons une classification qui regroupe les années suivant le climat et les rendements obtenus selon le type de sol. La classification a été faite selon les observations des bilans de campagne et des données de pluviométrie. Une synthèse de chaque bilan de campagne reprenant les faits marquants en termes de pluviométrie, de température, de pression de maladies et d'adventices est présentée en annexe 3.

L'analyse de la pluviométrie a été faite sur deux périodes : l'hiver (d'octobre à mars) et le printemps (d'avril à la deuxième décennie de juillet). La pluviométrie hivernale permet d'identifier un excès d'eau en hiver qui peut faire baisser les rendements dans les sols à tendance humide et parfois dans les sols profonds. La pluviométrie printanière a été regardée principalement pour identifier un déficit hydrique en sols à tendance séchant.

Dans ce document, le chiffre de l'année correspond à l'année de la récolte. Ainsi, l'année 2003 correspond au cycle 2002-2003. La pluviométrie hivernale (octobre à mars) varie de 356 mm pour l'année 2003 à 205 mm pour l'année 2012 (Figure 22). Seules deux années ont une pluviométrie supérieure à la normale. Cette normale est fortement augmentée par la décennie de 1990 où la pluviométrie hivernale a été largement supérieure aux décennies de 1980 et de 2000. Les années 2003, 2007 et 2008, 2013 et 2004 ont une pluviométrie supérieure à 300 mm. Les années 2011 et 2012 ont une pluviométrie inférieure à 250 mm.

Les pluviométries printanières se rapprochent d'avantages de la normale que les pluviométries hivernales (Figure 23). Elles varient de 114 mm pour 2006 à 339 mm pour 2012. La pluviométrie de 2006 est particulièrement faible alors que celle de 2012 est très élevée comparé aux autres années.

L'étude de ces graphiques nous indique le cumul de pluie sur les deux périodes mais ne donne pas la distribution de la pluviométrie lors de ces deux périodes. Pour identifier un stress hydrique, le choix qui a été fait est de calculer le nombre de jours pour avoir un cumul de pluie de 15 mm. Nous avons considéré, à dire d'expert, qu'à partir de 30 jours nécessaires pour avoir 15 mm, le rendement en sols très séchants, séchants et intermédiaires séchants baissait.

Les années 2003, 2007, 2010 et 2011 dépassent largement la barre des 30 jours alors que l'année 2006 dont le printemps était très peu pluvieux l'a dépasse à peine (Figure 24 et Figure 25). En 2006, la pluviométrie a été faible mais relativement régulière à l'inverse de 2010 et 2011. En 2003, le déficit de pluie n'est pas intervenu au printemps mais lors des mois de février et mars. Ces données confirment les observations faites dans les bilans de campagnes.

Ainsi, avec les observations des bilans de campagne et des analyses graphiques, nous avons abouti à 5 classes d'année climatique. Les lettres avant le « / » correspondent à la pluviométrie

Figure 24 : nombre de jours pour avoir 15 mm de pluie sur la période de février à juillet pour les années de 2003 à 2007

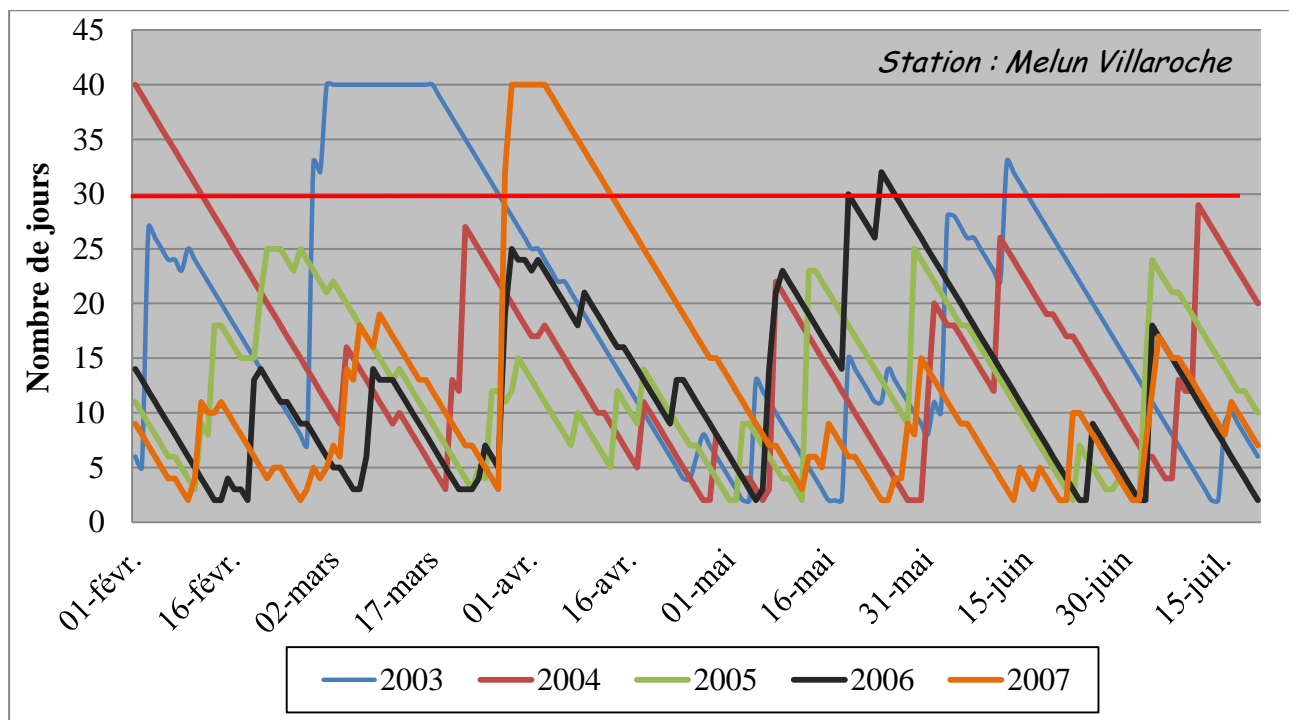
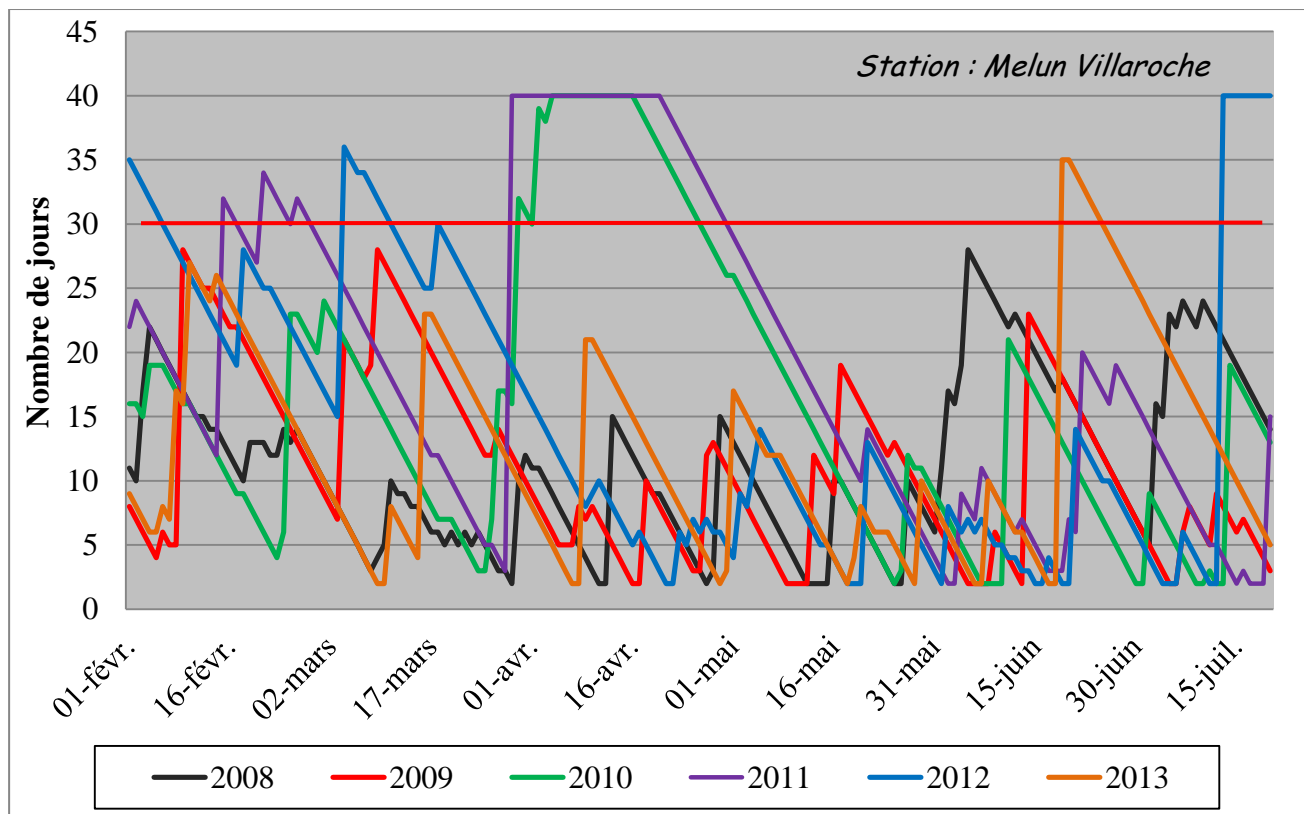


Figure 25: nombre de jours pour avoir 15 mm de pluie sur la période de février à juillet pour les années de 2008 à 2013



hivernale et celles après à la pluviométrie de printemps avec : PP : peu pluvieux ; M : moyennement pluvieux ; P : pluvieux. Voici les cinq classes :

- M/M : 2004, 2005, 2006 et 2009 : les pluviométries hivernale et printanière ont été moyennes, sans déficit ni excès d'eau, aucune perte de rendement majeure n'a été due aux températures, les rendements de ces années sont bons dans l'ensemble des sols.

- M/PP : 2010 et 2011 : la pluviométrie hivernale a été moyenne sans excès d'eau, le printemps (avril et mai) a été marqué par un déficit en eau. En 2010, une légère perte de rendement a été observée à cause du gel en hiver et de fortes températures lors du remplissage des grains : les rendements de ces années sont bons sauf en sols à tendance séchant

- P/M : 2008 et 2013 : la pluviométrie hivernale a été élevée à moyenne, des situations d'hydromorphie ont eu lieu en sols à tendance humide, le printemps a été moyennement pluvieux sans excès ni de déficit en eau, pas de pertes majeures de rendement dues aux températures, les rendements de ces années sont moyens.

- P/PP : 2003 et 2007 : la pluviométrie hivernale a été élevée avec un excès d'eau, la sortie de l'hiver ou le printemps a été marqué par un déficit en eau. En 2003, le gel en hiver et des fortes chaleurs lors du remplissage ont diminué le rendement. Les rendements sont mauvais l'ensemble des sols.

- PP/P : 2012 : la pluviométrie hivernale est faible, sans excès, ni déficit d'eau, la pluviométrie printanière est forte engendrant des pertes de rendement dues à l'humidité, aux adventices, aux maladies et aux conditions de récolte. Les rendements de cette année sont moyens.

Cette classification a été confrontée aux rendements de chaque année par type de sol obtenus sur le réseau. Cette confrontation a permis de confirmer la classification.

3) Présentation des analyses utilisées

Plusieurs analyses ont été utilisées pour l'étude. Cette partie consiste à présenter ces analyses afin de pouvoir comprendre ce qu'elles permettent de mettre en évidence Elle consiste également à expliquer le choix de ces analyses. L'ensemble des analyses a été effectué avec le logiciel de statistique R à l'exception des nuages de points qui ont été réalisés avec Excel.

3.1 Les représentations graphiques

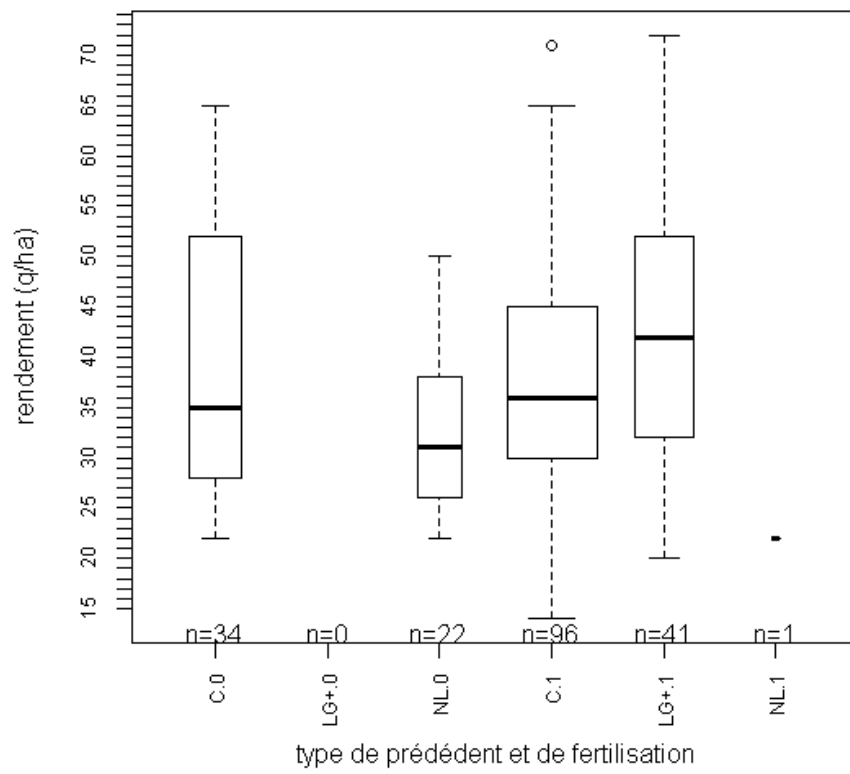
Les graphiques permettent notamment d'avoir une représentation visuelle des données. Nous avons utilisé le boxplot et le nuage de point.

3.1.1 *Le boxplot*

Le boxplot, ou « boîtes à moustaches » a été inventé par Tukey en 1977 pour représenter schématiquement la distribution d'une variable en fonction d'un ou de plusieurs facteurs (Le Guen, 2005). Il utilise 5 valeurs qui résument les données : le minimum, les 3 quartiles Q1, Q2 (médiane) et Q3 et le maximum. Le premier quartile (Q1) est la plus petite donnée de la série telle qu'au moins un quart des données de la série sont inférieures ou égales à Q1. Le troisième quartile (Q3) est la plus petite donnée de la série telle qu'au moins les $\frac{3}{4}$ des données de la liste sont inférieures ou égales à Q3. Ce graphique permet également d'identifier les valeurs aberrantes. C'est donc un bon moyen d'explorer les données et de voir leur variabilité.

Dans notre cas les boxplots nous serviront à représenter la distribution du rendement en fonction d'un ou de deux facteurs comme le type de précédent, ou encore la fertilisation. Une boîte allongée pour une modalité d'un facteur nous indiquera que les rendements sont très dispersés. De

Figure 26 : boxplot représentant le rendement en fonction du type de précédent et de la fertilisation



plus, si 2 modalités d'un facteur ont le même effet sur le rendement, les boîtes à moustache seront sensiblement les mêmes.

La largeur de la boîte à moustache est fonction du nombre d'individus (Figure 26). Ce dernier est également affiché sous chaque boîte à moustaches. En effet, il est important de connaître le nombre de données représentées par la boîte à moustaches : plus ce nombre est important, plus nous pourrions généraliser les résultats obtenus. La valeur d'une modalité dont une seule donnée est présente est symbolisée par un tiret. Les données aberrantes sont représentées par un cercle. Ainsi, sur la figure 26, la modalité la plus à gauche du graphique correspond au précédent C avec une fertilisation 0. Cette modalité comporte 34 individus. Les rendements varient de 65 q/ha à 22 q/ha. La médiane (symbolisée par la barre) est à 35 q/ha, le Q1 est de 28 q/ha et le Q3 est de 52 q/ha. Les rendements en précédent NL et fertilisation 0 sont plus homogènes que les rendements précédents C avec une fertilisation 0.

Ce type de graphique a été utilisé pour étudier l'ensemble des facteurs.

3.1.2 *Le nuage de point*

Le nuage de point permet de visualiser les données en fonction de 2 variables. Le point est positionné sur le graphique suivant ses coordonnées de l'axe x et de l'axe y. Il est possible de tracer des droites de régression linéaire et de calculer la pente de cette droite et son ordonnée à l'origine (Université Rennes1, 2010). Il est également possible de calculer le coefficient de corrélation pour savoir si les deux variables représentées sont linéairement corrélées. Ce type de graphique a été utilisé pour étudier l'effet de la dose d'azote sur le rendement. Ainsi, plus la pente est élevée, plus le rendement augmente avec la dose d'azote. Plus le coefficient de corrélation (R^2) se rapproche de 1, plus le rendement est corrélé à l'azote.

3.2 L'arbre de régression

Il a été développé par L. Breiman, J. Friedman, R. Olshen et C. Stone. Il consiste en une succession de divisions, avec pour point de départ l'ensemble de l'échantillon. La division s'opère au niveau d'un nœud père selon une condition logique basée sur un des facteurs (type de précédent, fertilisation, etc.). Elle donne lieu à 2 nœuds fils. On aboutit à la formation de nœuds terminaux qui maximisent l'inertie inter-groupe, et minimisent l'inertie intra-groupe pour la variable réponse, qui ici, est le rendement (Nakache et Confais, 2003). La croissance de l'arbre s'arrête lorsque tous les nœuds sont homogènes et qu'on ne peut plus les diviser. Le dernier nœud est appelé feuille. Pour chaque feuille, la moyenne du rendement des individus de cette feuille est indiquée, de même que le nombre d'individu constituant cette feuille. (Nakache et Confais, 2003). L'arbre de régression est très lisible. En revanche, ils font partie des techniques dites instables, c'est-à-dire que de petites modifications sur l'échantillon d'apprentissage peuvent avoir des effets importants sur la construction de l'arbre (Nakache et Confais, 2003).

Ainsi dans le cadre de l'étude, l'arbre de régression va nous permettre de hiérarchiser les facteurs en fonction de leur poids dans l'élaboration du rendement. Ainsi, le facteur qui permet de diviser le premier nœud père est celui qui pèse le plus dans l'élaboration du rendement. C'est la même chose pour les autres nœuds. Le nombre de fois où un facteur est utilisé pour diviser un nœud dans l'arbre donne également une information sur le poids de ce facteur dans l'élaboration du rendement.

3.3 L'analyse de variance et le test de Newman Keuls

L'analyse de la variance (ou ANOVA : ANalysis Of VAriance) est un test statistique permettant de vérifier que plusieurs échantillons sont issus d'une même population (Husson et Pages, 2005). L'analyse de la variance permet d'étudier le comportement d'une variable quantitative à expliquer (variable réponse : ici le rendement) en fonction d'une ou de plusieurs variables explicatives qualitatives (facteur). Elle permet de voir si le facteur a un effet significatif sur le rendement. En plus des effets principaux, qui sont les effets des facteurs, on peut également étudier les interactions entre plusieurs facteurs (on se limite souvent à une interaction entre 2 facteurs). Dans le cas de dispositif incomplet (comme les cas étudiés), les interactions ne peuvent pas être testées. Dans le cadre de l'étude, l'ensemble des facteurs sont considérés avec un effet fixe car nous nous intéressons spécifiquement à l'effet des modalités prises par les facteurs.

Pour tester l'effet global d'un facteur, la variabilité totale est décomposée en la somme de la variabilité due à chaque facteur. A partir de cette décomposition une statistique de test est calculé (la P-value). Si la P-value est inférieure à 0,05 le facteur a un effet significatif au seuil de 5% sur le rendement.

L'analyse de variance repose sur des hypothèses qu'il convient de vérifier. Ces hypothèses sont : la normalité des résidus, l'homogénéité de la variance des variables, et l'indépendance des échantillons. La normalité des résidus se vérifie avec le Test de Shapiro, l'homogénéité des variances se vérifie avec le test de Bartlett. Pour ces deux tests, si la P-value est supérieure à 0,05 alors les résidus sont normaux et la variance de la variable est homogène. Il n'existe pas de test pour tester l'indépendance des échantillons, par conséquent on suppose que chaque échantillon analysé est indépendant des autres échantillons. Si ces hypothèses ne sont pas respectées, il faut émettre des réserves sur les résultats obtenus.

Lorsque l'analyse de variance a permis de mettre en évidence un effet significatif d'un facteur, il est intéressant de connaître en détail quelles modalités du facteur permet d'obtenir un meilleur rendement. Pour cela nous utilisons le test de Newman Keuls. C'est un test de comparaison multiple qui consiste à classer les k moyennes du rendement correspondant aux k modalités du facteur en sous-ensembles homogènes (Husson et Pages, 2005). C'est ce à quoi font référence les lettres « A », « B », etc. dans les résultats de ce test. Ainsi, si 2 modalités n'ont pas un effet significativement différent sur le rendement alors elles seront classées dans le même sous-ensemble, elles porteront donc la même lettre.

Ces deux analyses ont été utilisées sur l'ensemble des données, c'est-à-dire toutes situations confondues, pour la hiérarchisation du poids de chaque facteur dans l'élaboration du rendement. Elles ont également été utilisées la quantification de l'impact d'un facteur particulier.

3.4 L'analyse des correspondances multiples et la classification

L'analyse des correspondances multiples (ACM) permet d'avoir une approche exploratoire de nos données. L'ACM nous permettra de comprendre le lien entre le rendement observé et l'ensemble de l'itinéraire technique conduit sur la parcelle. Elle s'utilise uniquement avec des variables qualitatives, il a donc été nécessaire de faire des classes de rendement.

L'ACM permet de dresser des typologies des individus. Elle rapproche les individus qui possèdent le même profil, c'est-à-dire ceux qui ont été cultivés selon le même itinéraire technique et qui ont un rendement similaire. De plus, on note que l'analyse rapproche deux individus d'autant plus que les modalités qu'ils ont en commun sont rares. Ainsi, 2 individus peuvent s'opposer en

tous points et être très proches sur le graphe des individus si ce sont les 2 seuls sur lesquels une certaine variété a été cultivée par exemple.

Le graphique des modalités (construit selon deux axes) montre les associations entre les modalités des différentes variables. Il nous permettra d'associer un itinéraire culturel à un rendement. En effet, deux modalités sont d'autant plus proches que beaucoup d'individus prennent les 2 modalités. Par construction, deux modalités d'une même variable sont donc éloignées. L'ACM permet de ne prendre en compte que certains facteurs dans l'élaboration des axes du graphique de modalité tout en projetant les autres modalités. Ainsi, les facteurs qui participent à l'élaboration des axes sont nommés « actifs » alors que les autres sont nommés « supplémentaires »

On réalise ensuite une classification ascendante hiérarchique des emblavements à partir de l'ACM. L'objectif est de séparer nos individus en différentes classes, que nous caractériserons par des modalités afin de faire émerger des profils types d'individus.

Le principe de la classification est d'agrèger à chaque étape les individus en classe, jusqu'à n'en obtenir qu'une seule. Au départ, chaque emblavement est considéré comme une classe. A chaque étape de l'algorithme, des classes sont agrégées entre elles selon un critère d'agrégation. En effet, 2 classes sont agrégées telles que l'inertie intra classe soit minimisée et l'inertie inter-classe maximisée. Enfin, il est possible de caractériser les différentes classes obtenues par les modalités de chaque variable de notre jeu de données afin de faire émerger les différents profils d'individus.

4) Organisation et mise en forme des données

Avant de faire les analyses, il a fallu établir le jeu de données et déterminer les modalités de chaque facteur. Ainsi, nous allons présenter les modalités de chaque facteur et les jeux de données utilisés.

4.1 Choix des modalités pour chaque facteur

Cette partie consiste à présenter l'ensemble des facteurs qui ont été étudiés et de justifier le choix des modalités. Ces dernières ont été établies afin d'avoir des modalités les plus équilibrées possibles en nombre d'individus tout en gardant une logique agronomique.

4.1.1 La fertilisation azotée

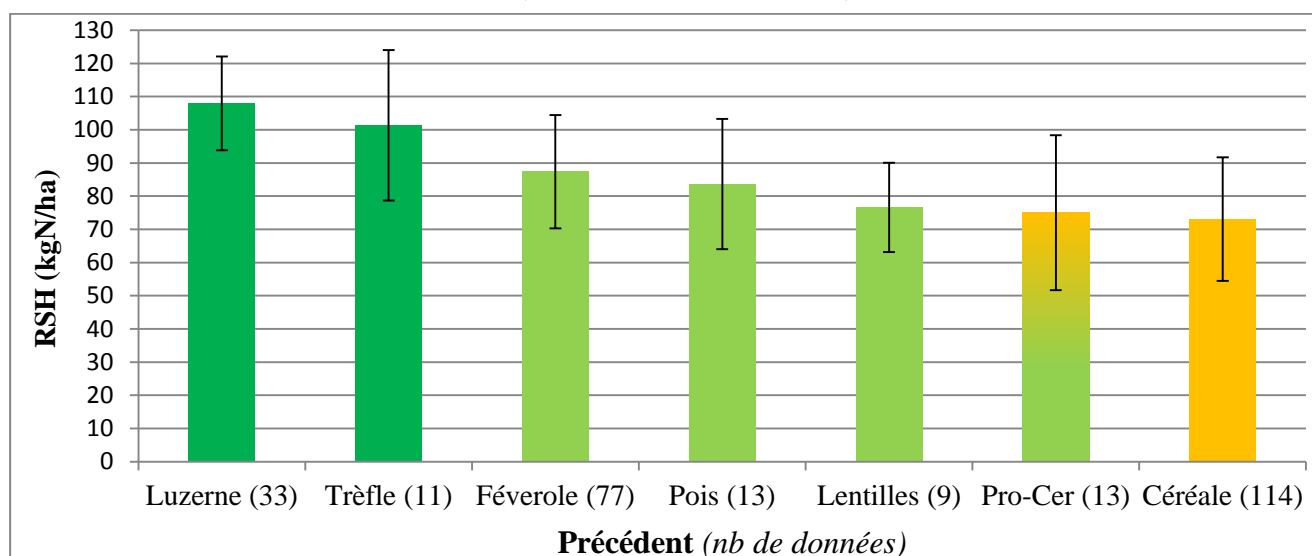
Les apports d'azote sur le réseau de fermes de références sont effectués avec plusieurs produits. Les engrais organiques (EO) les plus utilisés sont les fientes de poules, les vinasses de betterave et les farines de plume, de viande et d'os. Certains produits commerciaux sont des mélanges des produits précédents. Les agriculteurs apportent également des amendements organiques (AO) avec principalement du compost de déchets verts et de fumier de cheval. L'objectif de l'étude est d'étudier l'effet d'un apport azoté effectué sur le cycle de la culture ou juste avant. Les arrières effets n'ont donc pas été pris en compte.

Pour le calcul de la dose d'azote des engrais organiques, la diversité des produits utilisés ne nous permettait pas d'avoir un coefficient d'équivalence engrais N minérale efficace pour l'ensemble des produits notamment pour les produits commerciaux qui sont des mélanges. Au lieu de fixer une valeur arbitraire pour certains produits, nous avons préféré considérer l'azote organique total. Concernant les amendements organiques, nous avons considéré l'azote efficace car la plupart de l'azote organique totale n'est pas disponible pour le cycle de la culture. Pour cela nous avons utilisé les coefficients d'équivalence engrais N minérale efficace du COMIFER (COMIFER, 2013).

Tableau 5 : composition azotée des engrais et amendements organiques utilisés sur le réseau

Produit	Type de fertilisant	Composition (kg de N/t de produit brut)	Source
Fientes de poules (4% N)	EO	40	Analyse essai CA77
Fientes de poules (3% N)	EO	30	Analyse essai CA77
Guano (11/6/2)	EO	106	Fiche produit
Farine de plumes	EO	124	Analyse essai CA77
Orgalix F (Farine de plumes, soie de porc)	EO	120	Fiche produit
Orgabio (8/2/1) (Farine de plumes, fiente de volaille)	EO	80	Fiche produit
Orgabio (8/12/0) (Farine de viande)	EO	80	Fiche produit
Valorys GR2 (Farined'os)	EO	90	Fiche produit
Fertoganico (Farine de cuir)	EO	120	Fiche produit
Dynaster (Farined'os)	EO	80	Fiche produit
Autres produits à base de farine d'os	EO	60	Fiche produit
Vinasse	EO	21	Analyse essai CA77
Fumier de chevaux	AO	8	Guide MO ITAB, 2001
Compost de fumier cheval	AO	7	Analyse essai CA77
Fumier de volaille composté	EO	25	Guide MO ITAB, 2001
Compost de déchets verts	AO	10	Analyse essai CA77
Tige de persil compostée	EO	8	Estimation à dire d'expert
Compost DV + fumier de cheval	AO	8	Moyenne pondéré à la quantité entre compost DV et fumier de cheval
Compost DV + fientes de poules	AO	11	Moyenne pondéré à la quantité de déchet vert et de fiente

Figure 27 : RSH moyen sur 3 horizons (et écart type) suivant le précédent en AB en Ile-de-France (données de 2005 à 2014)



La composition en azote des engrais et amendements organiques utilisés lors de l'étude sont issus de différentes sources (Tableau 5). Pour les produits fertilisants qui ont fait l'objet d'essais de la part de la Chambre d'Agriculture de Seine-et-Marne la composition est issue des analyses des produits utilisés lors de ces essais. Cela permet d'avoir une composition des produits utilisés localement. Les valeurs utilisées sont issues d'une seule et même analyse : celle qui était la plus représentative des autres analyses du même produit. Pour les produits commerciaux, nous avons utilisé les valeurs présentes sur la fiche technique du produit. Enfin, pour le reste des produits, les valeurs utilisées sont celles présentées dans le Guide des Matières Organiques de l'ITAB (Leclerc, 2001).

A partir de la composition azotée décrite précédemment, le calcul de la dose d'azote apportée sur chaque emblèvement a été effectué. Une fois la dose d'azote calculée, nous l'avons regroupée par classe. Les doses calculées varient de 0 kg de N à 240 kg de N. Nous avons aboutis aux 5 modalités suivantes :

- 0 = 0 à 19 kg de N/ha : fertilisation nulle à très faible
- 1 = 20 à 60 kg de N/ha : fertilisation faible
- 2 = 61 à 100 kg de N/ha : fertilisation moyenne
- 3 = 101 à 139 kg de N/ha : fertilisation élevée
- 4 = 140 à 240 kg de N/ha : fertilisation très élevée

La première classe regroupe des blés non fertilisés ou très peu fertilisés. Les blés fertilisés dans cette classe ont seulement reçu un apport d'amendement organique. En effet, le premier apport d'engrais organique est de 20 kg de N/ha.

4.1.2 Le rendement et le taux de protéine

Les rendements varient de 15 q/ha à 83 q/ha. La moyenne et la médiane sont à 40 q/ha. Le Q1 est à 30 q/ha et le Q3 est à 50 q/ha. Pour l'ACM, les rendements ont été classés suivant 5 modalités :

- 15 à 25 q/ha : rendements faibles
- 26 à 35 q/ha : rendements moyens faibles
- 36 à 45 q/ha : rendements moyens élevés
- 46 à 55 q/ha : rendements bons
- 56 à 83 q/ha : rendements très bons

Pour le taux de protéine, les modalités ont été déterminées selon les possibilités de débouché des blés. Ainsi, nous avons réalisé 4 modalités : 8,5 à 9,9 % de protéine, 10 à 11,4 % de protéine, 11,5 à 12,9 % de protéine, 13 à 15 % de protéine. La première modalité ne peut pas être valorisée en panification. Les autres modalités peuvent l'être valorisées avec malgré tout une réfraction sur le prix de vente pour la 2^{ème} modalité (10 à 11,5 % de protéine).

4.1.3 Le désherbage mécanique, la date de semis et le travail du sol

Pour le nombre de passage de désherbage mécanique, deux facteurs ont été utilisés : un qui correspond au nombre de passage de herse étrille, bineuse et de houe rotative et un qui n'intègre que les passages de herse étrille et de bineuse. Les modalités sont les suivantes : 0 passage, 1 passage, 2 passages, 3 passages et de 4 à 6 passages.

Les dates de semis dont nous disposons s'étalent du 4 octobre au 26 novembre. Les 4 modalités sont les suivantes : 4 octobre au 14 octobre (semis précoce), 15 octobre au 24 octobre, 25 octobre au 4 novembre et 4 octobre au 26 novembre (semis tardif).

Tableau 6 : Jeu de données utilisé lors de l'étude

Nom de la Variable	Signification de la variable	Modalités et signification des modalités
annee	année	2003 à 2013
annee_M	type d'année météo	M/M ; M/PP ; P/M ; P/PP ; PP/P ; M = moyennement pluvieux ; P = pluvieux ; PP = peu pluvieux
agri	agriculteur	1 à 11
varieté	nom de la variété	nom de la variété
code_var	type de la variété	Productive ; Intermédiaire ; Protéine
rdt	rendement	rendement
rdt_ACM	classe de rendement	15_25 ; 26_35 ; 36_45 ; 46_55 ; 56_83
TP	classe du taux de protéine	[8,5_10[; [10_11,5] ; [11,5_13[; [13_15]
pcdt	précédent	Lu = Luzerne ; LF = Trèfle ; LG+ = Féverole et Pois pur ; LG- = Autre légumineuse à graine ; NL = Colza, Lin, Tournesol ; C = Céréale
semis	date de semis	4oct_14oct ; 15oct_24oct ; 25oct_4nov ; 4nov_26nov
dose_N	dose d'azote apportée	dose d'azote (en kg de N/ha)
ferti_N	classe de la dose d'azote	0 = 0_19 ; 1 = 20_60 ; 2 = 61_100 ; 3 = 101_139 ; 4 = 140_240
HE	présence de passage HE	HE = présence de passage de herse étrille; ss_HE = absence de passage de herse étrille
B	présence de passage de B	B = présence de passage de B ; ss_B = absence de passage de B
HR	présence de passage de HR	HR = présence de passage de HR ; ss_HR = absence de passage de HR
outil	combinaison des outils de désherbage mécanique	ss_desh = aucun désherbage ; B = passage uniquement de B ; HE = passage uniquement de HE ; HR = passage uniquement de HR ; HEB = passage combiné B et de HE ; HEHR = passage combiné de HE et de HR ; HEBHR = passage combiné de HE, de B et de HR ; BHR = passage combiné de B et de HR
HE_B	Classe du nombre de passage de HE et de B	0 ; 1 ; 2 ; 3 ; 4_6
desh	Classe du nombre de passage de HE, de B et de HR	0 ; 1 ; 2 ; 3 ; 4_6
labour	présence de labour	labour = présence de labour ; nn_labour = absence de labour
dech	classe du nombre de déchaumage	0 ; 1_2 ; 3_5
type_sol	nom du sol selon la classification agronomique et comportementale des sols de Seine-et-Marne	
sol	classe du type de sol	P = Profond ; TH = Très Humide ; H = Humide ; Int_H = Intermédiaire Humide ; TS = Très séchant ; S = Séchant ; Int_S = Intermédiaire Séchant
sol_B	battance du sol	B = sol battant ; nn_B = sol non battant

Légende variable du désherbage mécanique : HE : herse étrille ; HR : houe rotative ; B : bineuse

Le facteur labour comporte deux modalités : labour et sans labour. Ici, le sans labour signifie seulement que l'emblavement n'a pas été labouré. Le facteur déchaumage a été étudié par le nombre de déchaumage. Il a été réalisé trois modalités: 0 déchaumage, 1 à 2 déchaumage(s), 3 à 5 déchaumages

4.1.4 Le type de précédent et de variété

- Type de précédent :

Les précédents ont été classés suivants le fait qu'ils soient une légumineuse ou non et suivant les mesures de RSH (Figure 27). Nous avons regroupé les précédents en 7 classes :

- 1^{ère} classe : Lu : Luzerne
- 2^{ème} classe : LF : Trèfle
- 3^{ème} classe : LG+ : Féverole et pois pur
- 4^{ème} classe : LG- : mélange protéagineux céréale, lentille, lupin, soja et haricots verts
- 5^{ème} classe : NL : Non Légumineuses autre que céréale (lin, colza, tournesol)
- 6^{ème} classe : C : Céréale : blé, triticale, orge, avoine, sarrasin et maïs

- Type de variété :

Nous avons regroupé les variétés en trois modalités suivant leur aptitude à produire des protéines. Cette caractéristique a été déterminée à l'aide des résultats d'essai variété réalisé en zone Centre (région Ile-de-France, Centre et Picardie). Les modalités sont les suivantes :

- variété productive (type Atlass, Arrezzo, Apache, etc)
- variété intermédiaire (Achat, Koreli, mélange Renan (50 %) Atlass (50 %), etc)
- variété à protéine (Renan, Saturnus, Mélange Renan (80 %) Atlass (20 %), etc)

5) Jeux de données utilisés

En comptant les facteurs étudiés avec l'ACM, le jeu de données comporte 23 variables (Tableau 6). Les variables en gris sont uniquement utilisées pour l'ACM ou les analyses graphiques.

Sur les 443 individus, la date de semis n'est connue que sur 309 individus, la présence de labour et le nombre déchaumage ne sont connus sur seulement 268 individus. Ainsi, si nous souhaitons étudier les facteurs date de semis, labour et nombre de déchaumage, le nombre d'individus descend à 252 ce qui écart près de 200 individus du jeu de données initial. Ainsi, il a été réalisé deux jeux de données :

Le jeu de données initial : jeu de données avec les 443 individus où toutes les données des facteurs labour, nombre de déchaumage et date de semis ne sont pas connues.

Le jeu de données complètes : jeu de données avec 252 individus où toutes les données des facteurs labour, nombre de déchaumage et date de semis sont connues.

L'analyse de variance et le test de Newman Keuls, l'arbre de régression et l'ACM ont été réalisées sur les deux jeux de données. Pour l'analyse de variance et le test de Newman Keuls et l'arbre de régression, les facteurs type d'année météo, précédent, sol, fertilisation azotée, type de variété, nombre de désherbage (herse étrille, bineuse et houe rotative) et présence de binage ont été intégrées à l'analyse sur le jeu de donnée initial. Pour le jeu de données complètes, les facteurs sont les mêmes avec en plus les facteurs présence de labour, nombre de déchaumage et date de semis.

Pour la quantification d'un facteur particulier, des sous jeux de données ont été créés.

Figure 28: variation des rendements en fonction des agriculteurs

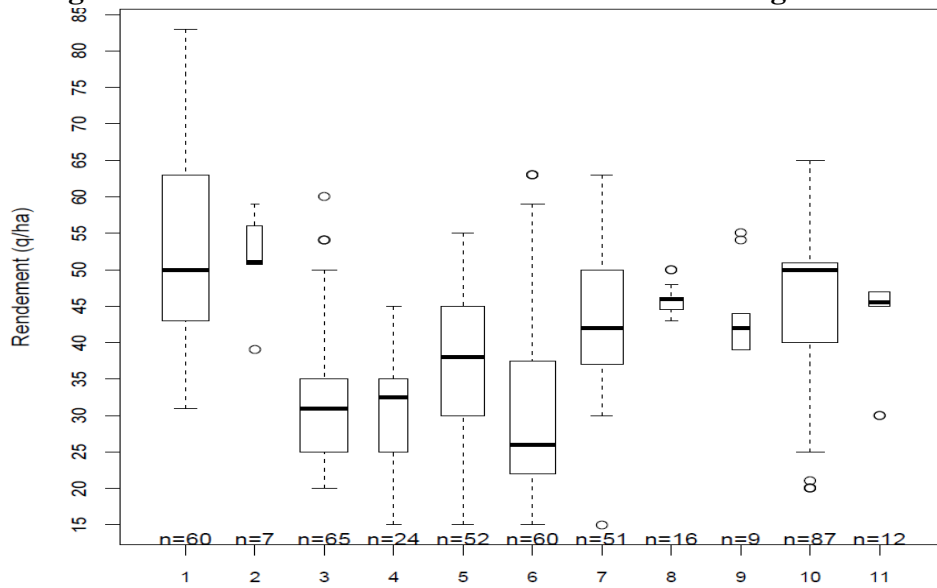


Figure 29 : variation des rendements en fonction des années

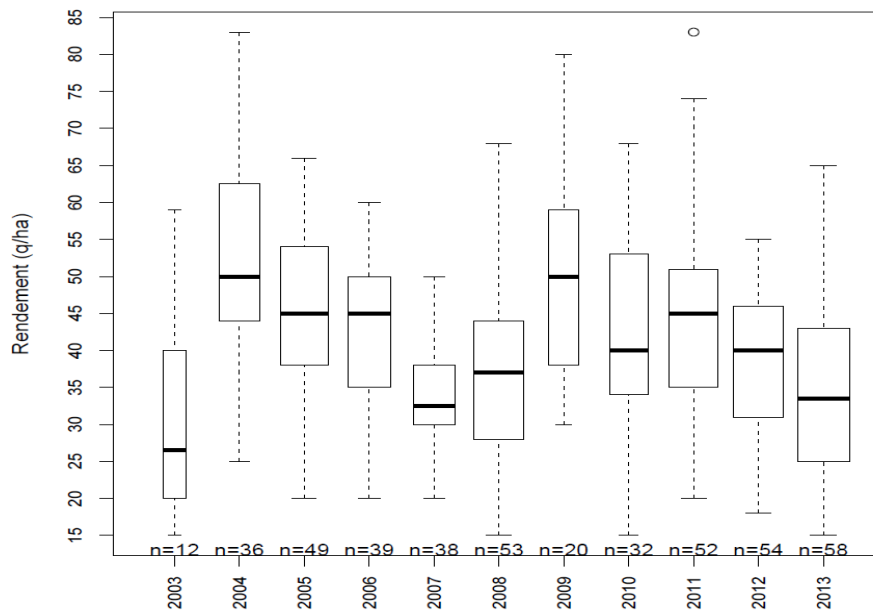
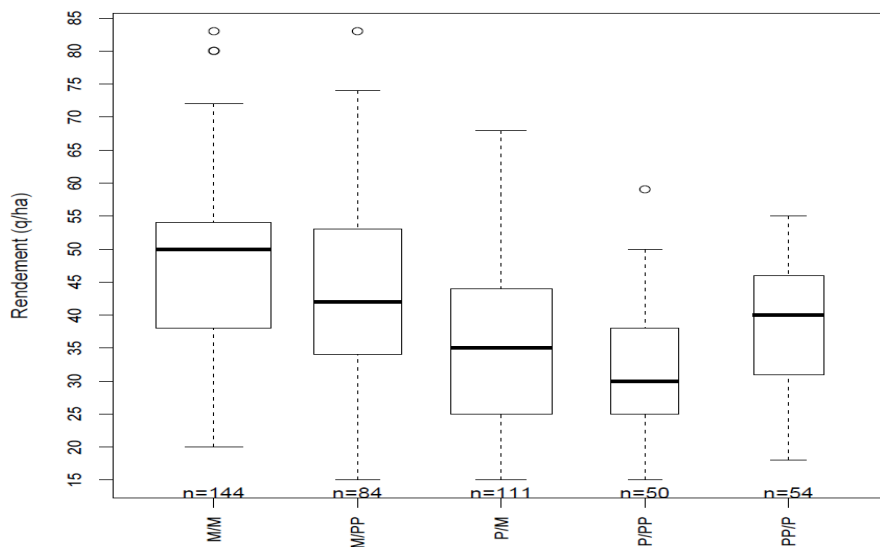


Figure 30 : variation des rendements en fonction du type d'années météo



III. ANALYSE DES RESULTATS ET DISCUSSIONS

L'analyse des résultats se déroule en quatre temps. Une première partie qui cherche à hiérarchiser le poids des facteurs dans l'élaboration du rendement, une deuxième qui cherche à quantifier l'impact d'un facteur particulier sur le rendement, une troisième qui vise à étudier l'impact de l'ensemble des pratiques culturales sur le rendement et une quatrième qui consiste à discuter les résultats obtenus.

1) Hiérarchisation des facteurs intervenants dans l'élaboration du rendement

La hiérarchisation des facteurs a été réalisée à partir des trois analyses suivantes : l'analyse graphique à l'aide de boxplots, une analyse de variance suivie du test de Newman Keuls et la réalisation d'un arbre de régression. Ainsi, les résultats graphiques, d'analyse de variance et de du test de Newman Keuls sont présentés dans une première partie facteur par facteur. Des graphiques avec deux facteurs sont également présentés pour étudier certaines interactions qui n'ont pas pu être testé par l'analyse de variance à cause de la nature des données. Une deuxième partie sera consacrée à l'étude de l'arbre de régression.

1.1 Analyse facteur par facteur

Une analyse de variance toutes données confondues a été réalisé afin d'identifier quels facteurs ont un effet significatif sur le rendement. Un test de Newman Keuls a été réalisée par la suite pour voir si les moyennes de certaines modalités sont significativement différentes. Pour les facteurs autres que labour, nombre de déchaumage et date de semis, seuls les résultats de l'analyse de variance et de comparaison de moyenne sur le jeu de données initial seront présentés. Pour les facteurs labour, nombre de déchaumage et date de semis, les résultats présentés sont ceux réalisés sur le jeu de données complètes.

Les sorties du logiciel R des analyses de variance sont présentes en annexe 4. D'après le test de Shapiro, les résidus des deux analyses de variance sont normaux. L'homogénéité de chaque variable sera présentée pour chaque facteur.

1.1.1 *L'agriculteur*

Seulement 11 agriculteurs sur les 12 du réseau sont présents car un agriculteur ne cultive pas de blé. Les rendements varient énormément en fonction des agriculteurs (Figure 28). On pourrait imaginer que ces variations soient dues aux types de sols présents sur chaque exploitation. Le même graphique en prenant en compte seulement les sols profonds montre une variation de rendement moins importante entre agriculteur mais celle-ci reste conséquente (Annexe 5). Cela montre que les variations de rendement sont liées non seulement au type de sol mais également aux pratiques de l'agriculteur. Ainsi, à travers le facteur agriculteur, on piste l'effet global d'un ensemble de pratiques et d'un ou plusieurs types de sol.

1.1.2 *L'année et le type de sol*

- L'année

Les variations obtenues suivant les années sont très importantes (Figure 29). Ainsi, les années 2003 et 2007 ont des rendements nettement inférieurs aux autres années avec plus de $\frac{3}{4}$ des rendements inférieurs à 40 q/ha. Le nombre de données en 2003 est faible, les résultats sont donc à considérer avec précaution. Les années 2008, 2012 et 2013 sont également des années médiocres, avec près des $\frac{3}{4}$ des rendements inférieurs à 45 q/ha. Ensuite, nous avons les années 2006, 2010 et 2011 avec les $\frac{3}{4}$ des données supérieures à 35 q/ha. Enfin, nous avons les bonnes à très bonnes

Tableau 7 : résultat du test de Newman Keuls sur le facteur type d'année météo

Facteur	Modalités	Minimum	Maximum	Moyenne	Groupe
Type d'année météo	M/M	20	83	46,97	A
	M/PP	15	83	42,75	B
	PP/P	18	55	39,35	C
	P/M	15	68	35,6	D
	P/PP	15	50	32,13	E

Figure 31: variation des rendements en fonction des types de sols

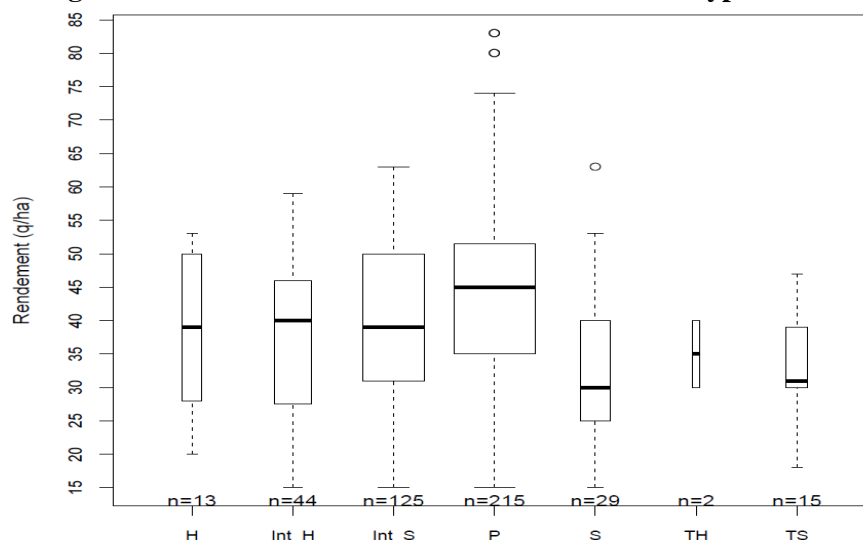
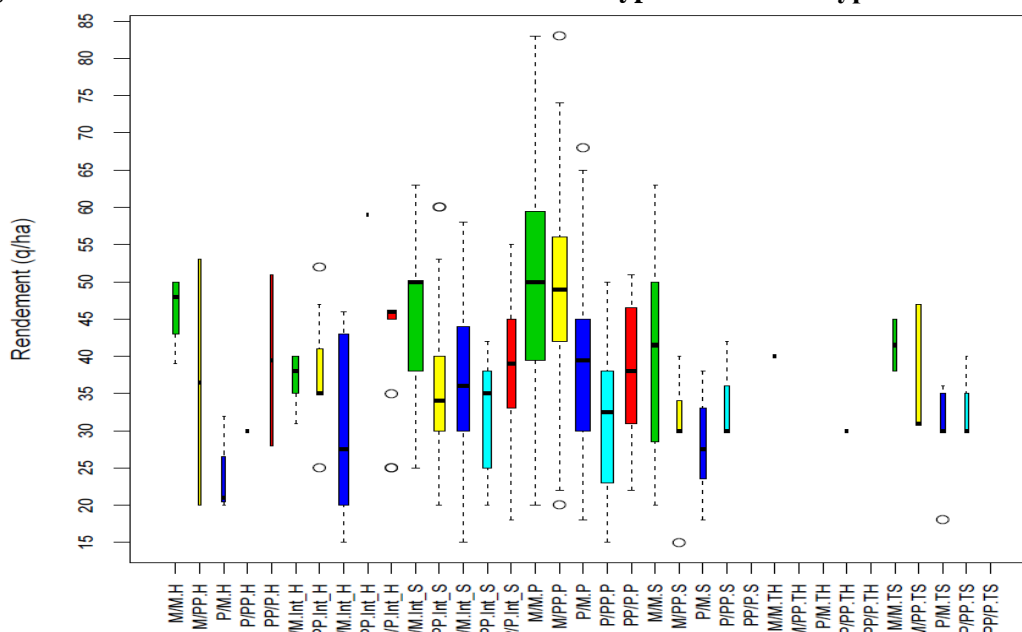


Tableau 8 : résultat du test de Newman Keuls sur le facteur type de sol

Facteur	Modalités	Minimum	Maximum	Moyenne	Groupe
Type de sol	P	15	83	43,7	A
	Int_S	15	63	39,39	AB
	H	20	53	37,31	B
	Int_H	15	52	36,07	B
	TH	30	40	35	B
	TS	18	47	34,6	B
	S	15	63	33,93	B

Figure 32: variation des rendements en fonction du type de sol et des types d'années météo



années : 2004, 2005 et 2009 dont presque les $\frac{3}{4}$ des rendements sont supérieurs à 40 q/ha (45 q/ha pour 2004).

Il existe une forte variabilité intra-annuelle. En moyenne, chaque année, l'écart entre le Q1 et le Q3 est de 17 q/ha. La moyenne des variations intra-annuelle est de 47 q/ha, elle varie de plus de 70 q/ha pour 2011 à 30 q/ha pour 2007.

- Le type d'année météo

Les années M/M (2004, 2005, 2006 et 2009) et M/PP (2010 et 2011) obtiennent globalement les meilleurs rendements, nous avons ensuite l'année PP/P (2012), les années P/M (2008 et 2013) et enfin les années P/PP (2003 et 2007). Les années avec un hiver pluvieux ont des rendements inférieurs aux autres années (Figure 30). Il y a bien entendu d'autres facteurs météo que la pluviométrie qui interviennent mais il semble y avoir une tendance défavorable aux hivers pluvieux. La variabilité des années P/PP et PP/P est moins importante cependant cela peut être dû au nombre de données plus faible dans ces modalités. On remarque que les rendements minimums sont sensiblement les mêmes suivant les types d'année météo. Les accidents de culture arrivent donc également lors des années météo favorables. A l'inverse, les rendements maximums sont beaucoup plus variables. Lors des années météo peu favorables, la météo semble être le facteur limitant, ce qui ne permet pas d'atteindre des rendements très élevés contrairement aux années météo favorables.

D'après l'analyse de variance, le facteur type d'année météo ressort très significatif. Toutefois l'homogénéité de la variance n'est pas vérifiée, il faut donc prendre avec précaution ces résultats. D'après le test de Newman Keuls, toutes les années météo ont un rendement significativement différent des autres (Tableau 7). Les années M/M arrivent en tête avec un rendement moyen qui s'élève à 46,97 q/ha. A l'inverse, les années P/PP, les rendements sont faibles avec une moyenne de 32,13 q/ha. L'année météo a donc un poids important dans l'élaboration du rendement.

- Le type de sol

Les sols profonds ont des rendements majoritairement plus élevés que les autres sols (Figure 31). Les sols séchants, très séchants et très humides ont des rendements majoritairement plus bas que les autres sols. On n'observe pas de différence notable entre les sols très séchants et séchants. Cependant ces résultats sont à prendre avec précautions compte tenu du faible nombre d'individus en particulier pour les sols très humides (2) et très séchants (15). Il semble également ne pas y avoir de différences entre les sols intermédiaires humides, intermédiaires séchants et humides. Il faut également prendre avec précaution ces résultats compte tenu du faible nombre d'individus (13) pour les sols humides. La variabilité des rendements est plus importante en sol profonds que dans les autres types de sols.

L'effet du facteur type de sol sur le rendement ressort très significatif. L'hypothèse d'homogénéité de la variance est vérifiée. D'après le test de Newman Keuls, les rendements en sols profonds sont significativement plus élevés qu'en sols humides, intermédiaires humides, très humides, séchants et très séchants (Tableau 8). La moyenne des rendements en sols profonds est de 43,7 q/ha. Les sols intermédiaires séchants obtiennent en moyenne 39,39 q/ha ce qui est plus élevé que les sols humides à 37,31 q/ha et que les sols intermédiaires humides à 36,07 q/ha. Les sols séchants ont des rendements moyens de 33,93 q/ha.

Le sol est donc un facteur important dans l'élaboration du rendement.

Figure 33: variation des rendements en fonction du type de précédent

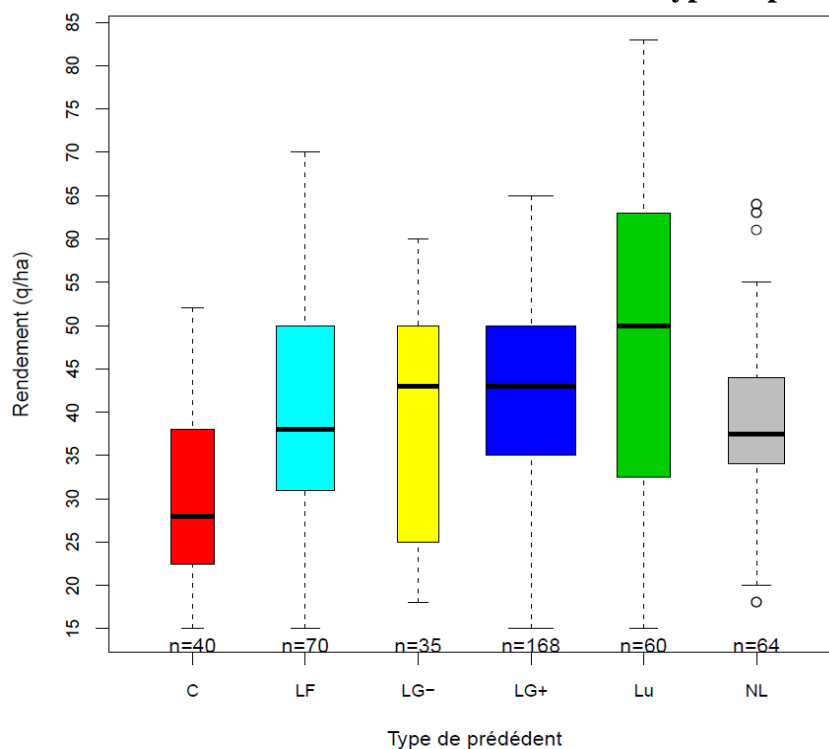
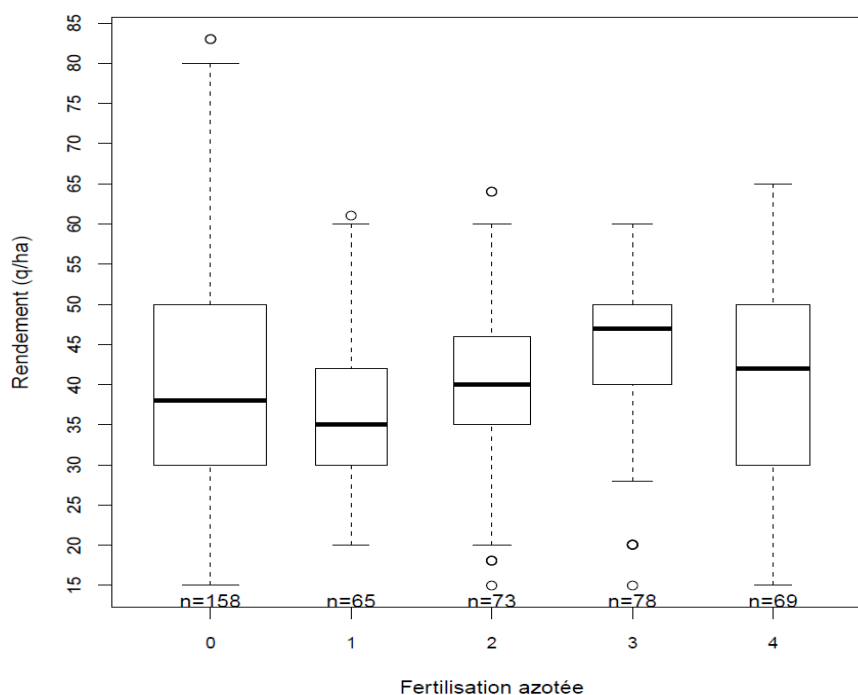


Tableau 9 : résultat du test de Newman Keuls sur le facteur précédent

Facteur	Modalités	Minimum	Maximum	Moyenne	Groupe
Précédent	Lu	15	83	48,52	A
	LG+	15	65	41,76	B
	LF	15	64	40,55	B
	LG-	20	60	39,71	B
	NL	18	64	38,75	B
	C	15	52	29,78	C

Figure 34: variation des rendements en fonction de la fertilisation azotée



- L'interaction type de sol / type d'année météo

Comparaison des rendements en fonction des types d'année météo pour un même type de sol :

On constate que pour tous les types de sol, les années M/M sont les meilleures en termes de rendement (Figure 32). En sols profonds, on remarque que les rendements les années M/M et M/PP sont sensiblement identiques et sont beaucoup plus élevés que les autres types d'année météo. Les sols profonds ne semblent donc pas souffrir du manque d'eau, ce qui n'est pas étonnant compte tenu de leur profondeur. Pour les sols intermédiaires séchant et séchant, on note une baisse importante de rendement entre les années M/M et M/PP. Les années M/PP sur sols intermédiaires séchant et séchant, les blés ont certainement connu un stress hydrique conséquent. On remarque que pour les sols intermédiaires humides et humides, les rendements en année P/M sont particulièrement bas. Les blés ont sans doute souffert de l'excès de pluie pendant l'hiver. Ce résultat est à considérer avec précaution compte tenu du faible nombre d'individus.

Comparaison des rendements en fonction des types de sol pour un même type d'année météo :

On remarque que les rendements ne varient pas en fonction du type de sol lors des années P/PP, l'effet du type de sol sur l'élaboration du rendement a donc été faible. A l'inverse, les années M/PP, les rendements en sols profonds sont nettement plus importants que les rendements dans les autres sols : l'effet du type de sol sur l'élaboration du rendement a donc été important. Il semble donc y avoir des interactions importantes entre les facteurs type de sol et type d'année météo.

1.1.3 Le type de précédent, la fertilisation azotée et le type de variété

- Le type de précédent

On observe des différences de rendement importantes suivant les précédents (Figure 33). Ainsi, pour le précédent céréale, $\frac{3}{4}$ des rendements sont inférieurs à 38 q/ha alors que ce chiffre est à 50 q/ha pour les précédents légumineuse à graine (LG+ et LG-) et le trèfle (LF). De plus, près des $\frac{3}{4}$ des rendements en précédent LG+ (féverole et pois) et luzerne sont supérieurs à 35 q/ha. Pour la luzerne, la moitié des rendements sont supérieurs à 50 q/ha. Le précédent NL (colza, tournesol, lin) a des rendements situés entre le précédent céréale et les différentes légumineuses. La variabilité des rendements en précédent luzerne est de près de 70 q/ha.

Le précédent a un effet très significatif sur le rendement. L'hypothèse d'homogénéité de la variance est vérifiée. D'après le test de Newman Keuls, le précédent luzerne est significativement différent des autres précédents avec un rendement moyen de 48,52 q/ha (Tableau 9). Les rendements des précédents céréales, avec seulement 29,78 q/ha de rendement moyen, sont significativement plus faibles que les autres précédents. Les précédents LG+, LG-, LF et NL ont en moyenne des rendements proches, de 41,76 q/ha pour les précédents féverole et pois, à 38,75 q/ha pour les précédents colza, tournesol et lin.

- La fertilisation azotée

Les rendements avec une fertilisation nulle à très faible (0 : 0 à 19 kg de N/ha) sont très variables (de 15 à 83 q/ha) (Figure 34). Ils sont supérieurs à ceux avec une fertilisation faible. Cela peut s'expliquer par le nombre de données plus importantes mais surtout par le fait que lorsqu'il n'y a pas de fertilisation, d'autres facteurs peuvent devenir prépondérants. Pour les fertilisations faibles (1 : 20 à 60 kg de N/ha), moyennes (2 : 61 à 100 kg de N/ha) et élevées (3 : 101 à 139 kg de N/ha), on remarque que les rendements ont tendance à être plus élevées avec l'augmentation de la fertilisation azotée. Ainsi, la médiane augmente de 12 q/ha entre les fertilisations 1 et 3. Les rendements des blés fortement fertilisés (4 : \geq 140 kg de N/ha) sont plus variables que pour les

Tableau 10 : résultat du test de Newman Keuls sur le facteur fertilisation azotée

Facteur	Modalités	Minimum	Maximum	Moyenne	Groupe
Fertilisation azotée	3	15	60	44,14	A
	0	15	83	41,29	A
	4	15	65	40,84	A
	2	15	64	39,97	A
	1	20	61	36,49	B

Figure 35: variation des rendements en fonction de la fertilisation azotée et du précédent

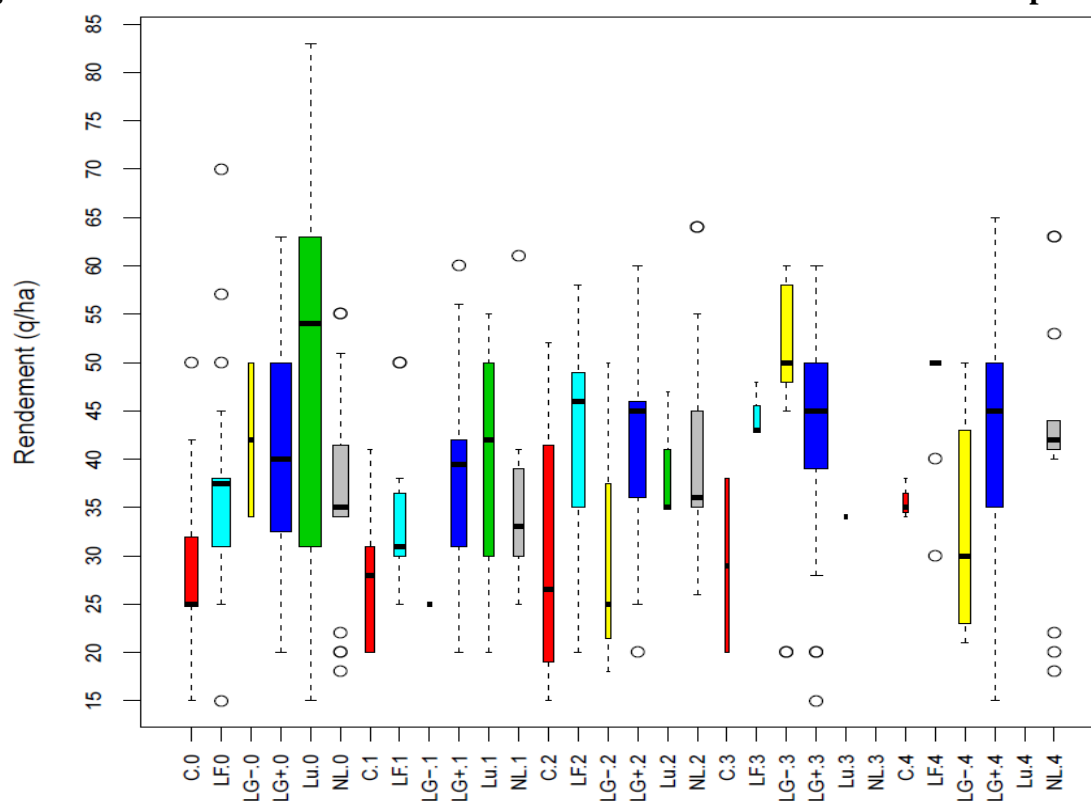
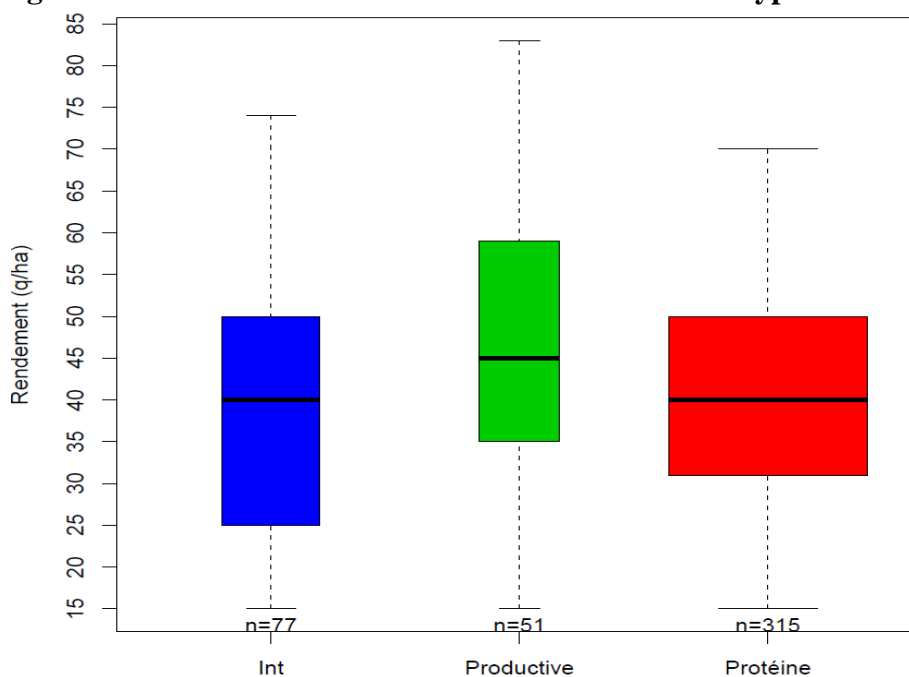


Figure 36: variation des rendements en fonction de du type de variété



blés avec les fertilisations 1, 2 et 3. On peut émettre l'hypothèse que certains apports de fertilisation ont été mal valorisés par la culture.

Le facteur fertilisation azotée a un effet très significatif. Cette variable a une variance homogène. D'après le test de Newman Keuls, les rendements avec des apports azotés de 20 à 60 kg de N/ha sont significativement plus faibles que les rendements avec les autres apports (Tableau 10). Les moyennes des fertilisations nulles à très faibles (0 à 19 kg de N/ha), moyennes (61 à 100 kg de N/ha), élevées (101 à 139 kg/ha) et très élevées (≥ 140 kg/ha) ne sont pas significativement différentes. Il est étonnant que les blés non fertilisés aient en moyenne des rendements plus importants que les blés avec une fertilisation faible. Il est donc intéressant d'étudier les interactions fertilisation / précédent et fertilisation / année pour chercher à comprendre ces résultats.

- L'interaction fertilisation azotée / précédent

Comparaison du rendement en fonction du précédent pour une même fertilisation.

Pour une fertilisation nulle à très faible, on remarque que les rendements en précédent céréale sont beaucoup plus faibles que les autres précédents (Figure 35). Ainsi, en précédent céréale, les $\frac{3}{4}$ des rendements sont inférieurs à 31 q/ha alors que pour les autres précédents, au moins les $\frac{3}{4}$ des rendements sont supérieurs à 31 q/ha. Toujours pour une fertilisation nulle à très faible, les rendements en précédent luzerne sont plus élevés que ceux des autres précédents. Ainsi 50 % des blés de luzerne avec une fertilisation nulle à très faible obtiennent plus de 54 q/ha. Ces résultats sont sans doute en partie liés au RSH qui est en général faible après une céréale et élevé après la luzerne. On note d'ailleurs que les blés de luzerne ne reçoivent pas d'engrais organique dans 77 % des cas. Ils sont donc surreprésentés dans la modalité fertilisation nulle à très faible et sous représentés dans les autres modalités de fertilisation. Compte tenu de l'effet positif de la luzerne sur le rendement, cela explique en partie que la moyenne de rendement avec une fertilisation nulle à très faible soit plus importante que celle avec une fertilisation faible.

Pour les fertilisations faibles, moyennes et élevées les différences de rendement entre les précédents sont globalement identiques à celles avec une fertilisation nulle à très faible à l'exception du précédent LG-.

Comparaison du rendement en fonction de la fertilisation azotée pour un même précédent

Pour chaque précédent, on ne voit pas de différence de rendement notable entre une fertilisation nulle à très faible et une fertilisation faible, à l'exception des rendements précédent luzerne et LG+ avec une fertilisation nulle à très faible qui atteignent des niveaux de rendement plus importants que ceux avec un apport d'azote faible. Entre les apports d'azote faibles (1), moyens (2) et élevés (3), on remarque, pour chaque précédent, que les rendements ont tendance à être plus importants avec l'augmentation de la dose azotée (à l'exception du précédent céréale, luzerne et LG-). On remarque que les rendements des blés précédents féverole et pois ne semblent pas évoluer entre une fertilisation azotée élevée et très élevée.

- L'interaction fertilisation azotée / type d'année météo

Les rendements augmentent avec la dose d'azote seulement lors des années PP/P et M/M (si on exclut les cas avec une fertilisation nulle à très faible pour les années M/M) (Annexe 6). Pour les autres années, aucune tendance ne semble se dessiner. Il semblerait donc que certaines années, les apports azotés ne soient pas bien valorisés par la culture. Il existe certainement une interaction fertilisation azotée / type d'année météo.

Tableau 11: résultat du test de Newman Keuls sur le facteur variété

Facteur	Modalités	Minimum	Maximum	Moyenne	Groupe
Type de variété	Productive	15	83	46,88	A
	Protéine	15	70	40,33	B
	Int	15	74	38,68	B

Figure 37: variation des rendements en fonction de la date de semis

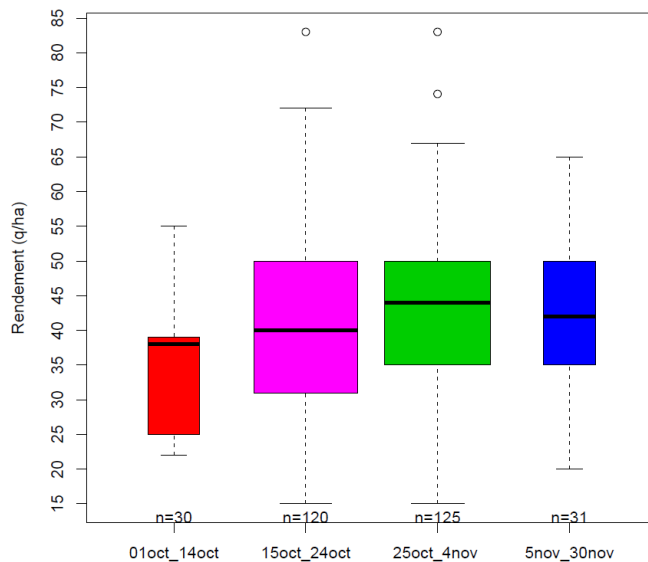


Tableau 12 : résultat du test de Newman Keuls sur le facteur présence date de semis

Facteur	Modalités	Minimum	Maximum	Moyenne	Groupe
Date de semis	25oct_4nov	15	83	43,57	A
	15oct_24oct	15	83	42,38	A
	5nov_30nov	20	65	41,82	A
	01oct_14oct	22	39	32,33	B

Figure 38: variation des rendements en fonction de la présence de labour

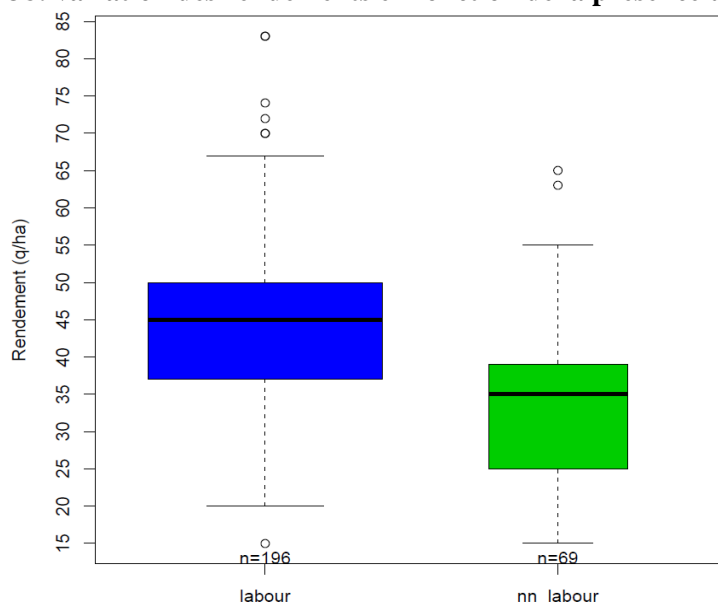


Tableau 13 : résultat du test de Newman Keuls sur le facteur présence de labour

Facteur	Modalités	Minimum	Maximum	Moyenne	Groupe
labour	labour	15	83	44,38	A
	Nn_labour	15	65	33,65	B

- Le type de variété

D'après la figure 36, on note que les variétés productives obtiennent globalement des meilleurs rendements que les autres variétés. Toutes situations confondues, les variétés intermédiaires obtiennent globalement les mêmes résultats que les variétés à protéine.

Le facteur type de variété a un effet très significatif sur le rendement. Cette variable a une variance homogène. Toutes situations confondues, les rendements en type de variétés productives sont en moyenne de 46,88 q/ha et sont significativement plus élevés que les rendements des autres types de variété (Tableau 11).

1.1.4 Le nombre de désherbage mécanique et la présence de binage

- Le nombre de passage d'outils de désherbage mécanique (HE, B et HR)

Le nombre de passage d'outil de désherbage mécanique ne semble pas avoir un poids important dans l'élaboration du rendement, en effet seules les médianes diffèrent (Annexe 7).

Malgré tout, l'effet du nombre de désherbages mécaniques sur le rendement ressort significatif. Cette variable a une variance homogène. Le test de Newman Keuls ne permet pas de mettre en évidence une différence de rendement significative entre les différentes modalités (Annexe 7). En observant les moyennes, aucune tendance ne semble se dessiner. Toutes situations confondues, le nombre de désherbage mécanique ne pèse pas ou très peu dans l'élaboration du rendement.

- La présence de binage

Toutes situations confondues, les rendements des blés binés ou non sont sensiblement identiques, seule la médiane est différente (Annexe 7). L'effet du binage ne ressort pas significatif au seuil de 5%. Nous ne pouvons donc pas faire de test de Newman Keuls. Les moyennes entre les deux modalités sont presque identiques (Annexe 7). Toutes situations confondues, le binage ne pèse pas ou très peu dans l'élaboration du rendement.

1.1.5 La date de semis, la présence de labour et le nombre de déchaumage

- La date de semis

Les rendements des blés semés précocement (1 octobre au 14 octobre) sont moins importants que ceux des blés semés plus tardivement. On n'observe pas de différence notable entre les autres dates de semis (Figure 37).

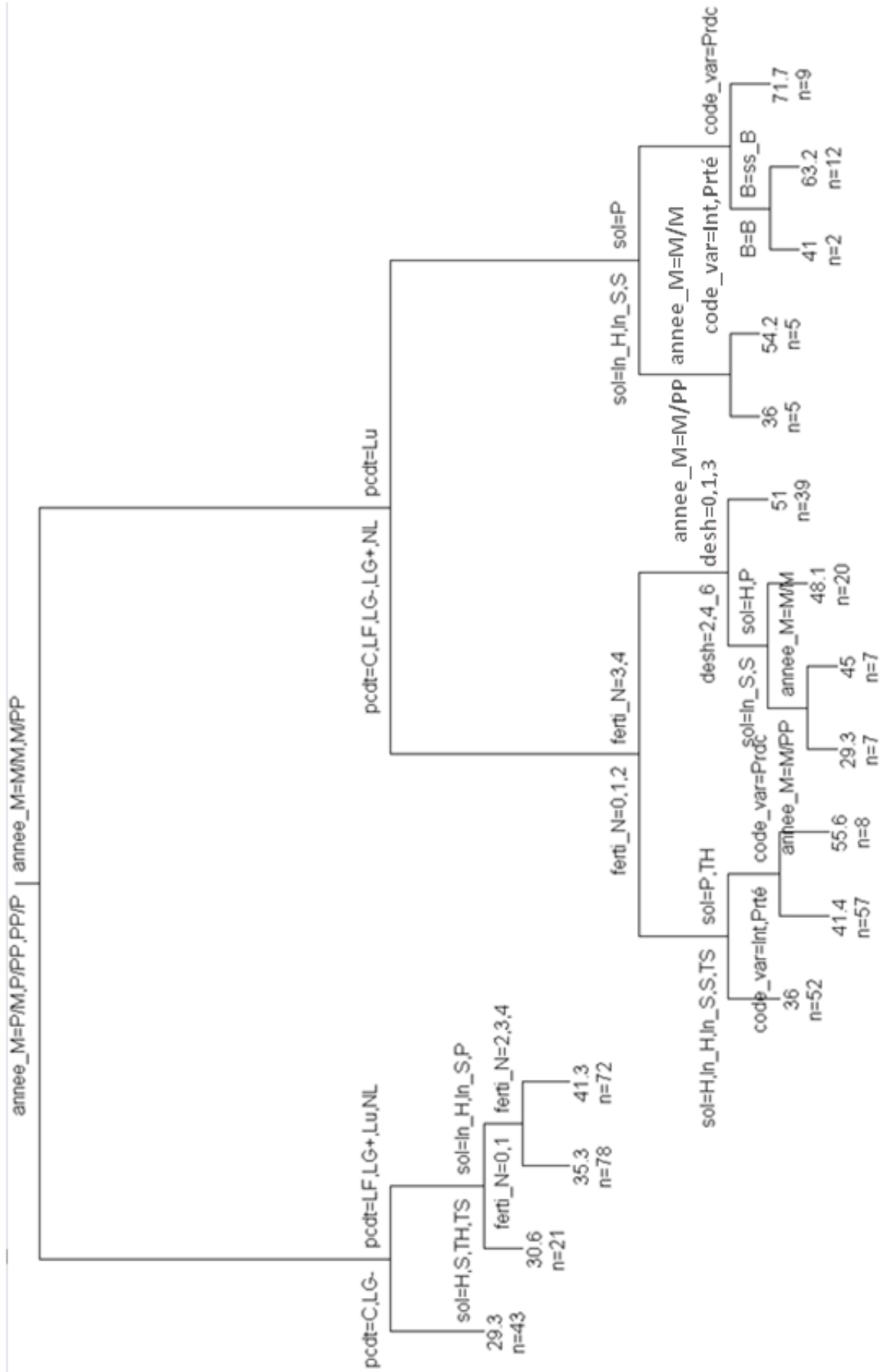
La date de semis a un effet significatif. La variable date de semis a une variance homogène. D'après le test de Newman Keuls, les dates de semis précoces dont la moyenne de rendement est de 32,33 q/ha, obtiennent un rendement significativement plus faible des autres dates de semis (Tableau 12). La différence entre les autres dates de semis n'est pas significative. Il faut prendre ces résultats avec précaution car le nombre de données pour les dates précoces et tardives est quatre fois moins important que pour les autres dates.

- La présence de labour

Les rendements obtenus sans labour sont beaucoup plus faibles que ceux obtenus avec labour (Figure 38). Ainsi, les $\frac{3}{4}$ des rendements des blés sans labour sont inférieurs à 39 q/ha alors que les $\frac{3}{4}$ des blés labourés ont un rendement supérieur à 36 q/ha.

L'effet du labour sur le rendement ressort très significatif. La variable a une variance homogène. D'après le test de Newman Keuls, toutes situations confondues, les rendements en sans labour sont significativement différents des rendements avec labour (Tableau 13). Le facteur présence de labour a donc un effet sur le rendement toutes situations confondues. Cependant, le

Figure 39 : arbre de régression sur le jeu de données initial



nombre d'individus en non labour est presque 3 fois moins importants que le nombre d'individus en labour, il faut considérer ces résultats avec précaution.

- Le nombre de déchaumage

Les rendements sont sensiblement les mêmes selon le nombre de déchaumages (Annexe 8). L'effet du facteur nombre de déchaumage n'est pas significatif au seuil de 5%. Nous ne pouvons donc pas faire de test de Newman Keuls. D'après les moyennes de chaque modalité, aucune logique ne semble se dessiner (Annexe 8). Le nombre de déchaumage semble donc avoir peu de poids dans l'élaboration du rendement.

- En résumé :

L'analyse de variance a permis de mettre en évidence un effet significatif du type d'année météo, du type de sol, du précédent, de la fertilisation azotée, du type de variété, du nombre de désherbages mécaniques, de la présence de labour et de la date de semis. Des différences significatives des moyennes entre modalités ont été observées pour chacun de ces facteurs sauf pour le nombre de désherbages mécaniques.

D'après les p-value, les facteurs qui pèsent le plus dans l'élaboration du rendement (dans le jeu de données initial) sont dans l'ordre : l'année météo, le précédent, le sol, la fertilisation azotée, le type de variété et le désherbage mécanique. Sur le jeu de données complètes, la p-value pour le facteur du labour est plus importante que celle de la date de semis. Il n'est pas possible de comparer ces p-value à celles obtenues dans l'autre analyse car ce n'est pas le même modèle.

D'après l'analyse des graphiques, il semblerait qu'il existe des interactions entre le type de sol et le type d'année météo, entre la fertilisation azotée et le type d'année météo et entre la fertilisation azotée et le type de précédent.

1.2 Analyse de l'impact des facteurs par l'intermédiaire de l'arbre de régression

De même que pour l'analyse de variance, deux arbres de régression ont été effectués. Seul celui sur le jeu de données initial est présenté. Une description de l'arbre de régression et les données numériques de l'arbre qui permettent de connaître le nombre d'individus et le rendement moyen de chaque branche sont présentées en annexe 9.

Globalement, on constate que :

- Le facteur type d'année météo a le poids le plus important dans l'élaboration du rendement. En effet il est discriminant dès le départ et à nouveau dans la suite des branches (Figure 39).
- C'est ensuite le facteur type de précédent qui pèse le plus, il intervient dans les deux cas après la première division.
- Le facteur sol a également un poids important dans l'élaboration du rendement, il discrimine 2 nœuds sur 4 lors de la troisième division et à nouveau 2 nœuds dans la suite de l'arbre
- Le facteur fertilisation azotée a également un poids important dans l'élaboration du rendement, il discrimine 1 nœud sur 4 lors de la troisième division et un autre nœud.
- Le type de variété intervient également dans l'élaboration du rendement mais en moindre mesure que les facteurs type d'année météo, type de précédent, type de sol et fertilisation.
- Enfin, la présence de binage et le nombre de passages de désherbage mécanique pèse peu dans l'élaboration du rendement. En effet, il discrimine seulement 1 nœud chacun.

Figure 40 : rendement en fonction de la dose azotée en précédent LG+ (féverole et pois) en sols profonds, en variété à protéine

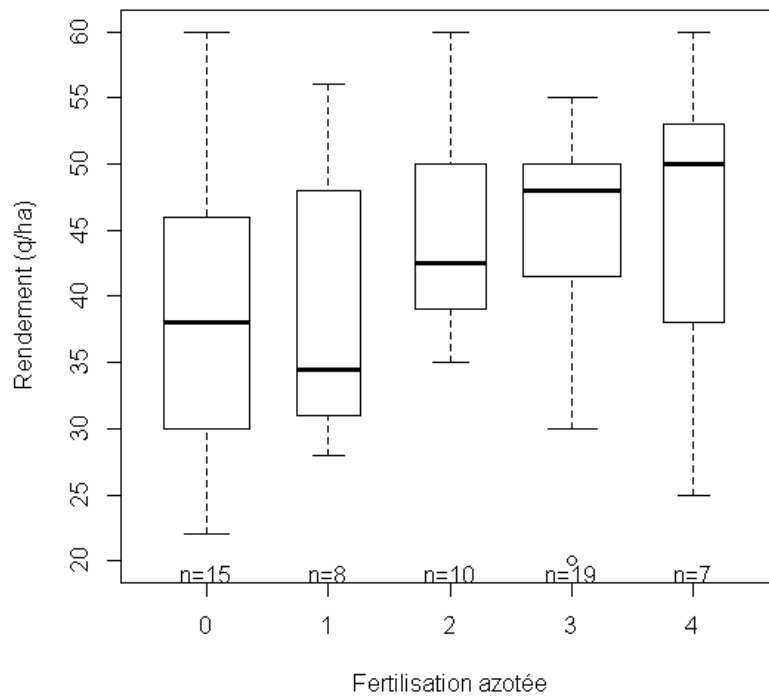
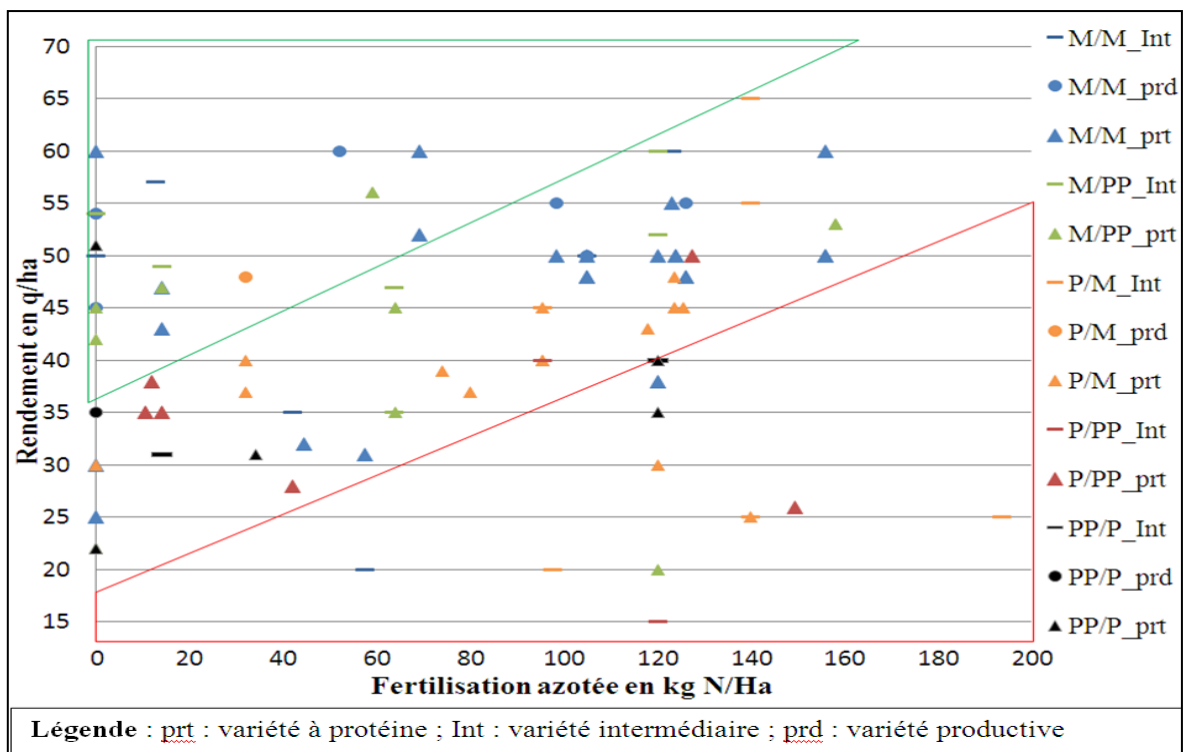


Figure 41 : rendement en fonction de la fertilisation azotée en sols profonds en précédent LG+ : identification de trois zones



Cet arbre permet déjà de quantifier l'impact des facteurs sur le rendement dans certains cas bien précis. La branche 1 permet de mettre en évidence qu'en année P/M, P/PP et PP/P les blés :

- avec un précédent céréale et LG- (principalement association protéagineux céréale) obtiennent en moyenne 8 q/ha de moins que les autres précédents.
- Avec un précédent trèfle, féverole et pois, luzerne, et NL (tournesol, colza, lin), en sols profonds, intermédiaires humides et intermédiaires séchants obtiennent en moyenne 7 q/ha de plus que les autres sols.

La branche 2 permet de mettre en évidence qu'en année M/M et M/PP les blés avec un :

- précédent luzerne obtiennent en moyenne 16 q/ha de plus que les blés des autres précédents.
- précédent luzerne, en sols profonds obtiennent 17 q/ha de plus que les sols intermédiaires humides, intermédiaires séchants et séchants.
- luzerne en sol profond, les variétés productives obtiennent 11 q/ha de plus que les autres variétés.

Les rendements en précédent autres que la luzerne avec une fertilisation:

- élevée et très élevée sont en moyenne supérieurs de 7 q/ha aux autres fertilisations.
- élevée et très élevée et un nombre de passage d'outil de désherbage mécanique de 2 et de 4 à 6, les sols profonds obtiennent 11 q/ha de plus que les sols intermédiaires séchants et séchants.
- nulle à moyenne, les sols profonds (1 seul individu en sol TH) obtiennent 7 q/ha de plus que les autres sols.
- élevée et très élevée, en sols profonds (1 seul individu en TH), les variétés productives obtiennent 14 q/ha de plus que les autres variétés.

Pour l'arbre avec le jeu de données complètes, les facteurs qui pèsent le plus sont les mêmes soit : le type d'année météo, le précédent, la fertilisation et le sol. C'est ensuite la date de semis qui est la plus discriminante et enfin la variété. Le nombre de désherbages et de déchaumages, la présence de binages et de labour n'apparaissent pas comme discriminant.

- En résumé :

L'analyse de variance, le test de Newman Keuls et l'arbre de régression ont permis de faire une hiérarchisation des facteurs. Ainsi, l'année météo a le poids le plus important dans l'élaboration du rendement. Arrive ensuite le type de précédent. Ensuite nous avons le type de sol et la fertilisation, puis le type de variété et la date de semis et enfin le labour. Le nombre de déchaumages, de désherbages et la présence de binages interviennent moins que les autres facteurs.

2) Quantification de l'impact des pratiques sur le rendement

Pour quantifier plus précisément les impacts d'un facteur sur le rendement nous avons choisi de nous affranchir de l'effet d'autres facteurs pouvant interagir en travaillant au sein d'une même modalité de type de sol, de fertilisation azotée ou de précédent. Nous avons ainsi étudié l'effet du précédent et de la fertilisation azotée qui sont les facteurs qui influencent le plus le rendement avec le type d'année météo et le type de sol. Le facteur type de variété n'a pas été testé car 70 % des blés sont des variétés à protéine, le nombre d'individus pour les autres modalités était donc très faible, les résultats n'auraient donc pas été pertinents. Pour tester les autres facteurs, où aucune différence notable de rendement n'a été observée précédemment, il faut lisser un nombre importants de facteur (sol, précédent, fertilisation, variété). Le nombre de données disponibles n'est pas assez suffisant. Ces facteurs seront analysés par la suite avec l'ACM. Les sorties du logiciel R pour les analyses de variance sont présentes en annexe 10.

Tableau 14 : effectif de chaque couple « type d'année météo/varieté » dans chacune des 3 zones de la figure 41

	Effectif (en % de l'effectif total)	Effectif (en % de l'effectif de la zone rouge)	Effectif (en % de l'effectif de la zone du milieu)	Effectif (en % de l'effectif de la zone verte)
M/M_Int	6	7	5	10
M/M_prd	9	0	7	20
M/M_prt	25	7	29	25
M/PP_Int	6	0	7	10
M/PP_prt	12	7	8	25
P/M_Int	8	21	7	0
P/M_prd	1	0	0	5
P/M_prt	15	14	20	0
P/PP_Int	2	7	2	0
P/PP_prt	6	7	8	0
PP/P_Int	3	14	2	0
PP/P_prd	1	0	2	0
PP/P_prt	5	14	3	5
Int	26	50	22	20
prd	11	0	8	25
prt	63	50	69	55
M/M	40	14	41	55
M/PP	18	7	15	35
P/M	24	36	27	5
P/PP	9	14	10	0
PP/P	10	29	7	5

2.1 Quantification de l'impact de la fertilisation azotée sur le rendement

Pour étudier la fertilisation, nous avons cherché à sélectionner un type de sol, un type de précédent et un type de variété particulier en ayant le plus d'individus possible. Deux cas ont pu être étudiés :

- en sols profonds et précédent LG+ (féverole et pois) : 93 individus dont 59 en variété à protéine
- en sols intermédiaire séchant et en précédent LG+ : 40 individus dont 28 en variété à protéine

2.1.1 *Cas des sols profonds*

La figure 40 permet de mettre en évidence que les rendements augmentent globalement avec la dose azotée. Les rendements avec une fertilisation nulle et faible sont sensiblement identiques, de même que ceux avec une fertilisation élevée et très élevée. Cependant, nous observons que pour une même dose d'azote, les rendements sont très variables. Ainsi pour la dose azotée très élevée, les rendements s'étalent de 25 q/ha à 60 q/ha, ceux avec une fertilisation nulle à très faible s'étalent de 22 q/ha à 60 q/ha.

Nous avons testé par une analyse de variance, l'effet de la dose azotée sur le rendement. Le modèle inclus l'effet de la fertilisation et celui du type d'année météo. L'interaction n'a pas pu être testée car le plan d'expérience n'est pas complet.

Toutes années confondues, l'effet de la fertilisation n'est pas significatif. Le type d'année météo est significatif. Il aurait été intéressant de tester l'effet de la fertilisation pour chaque type d'année météo séparément, cependant le nombre d'individus ne nous le permettait pas. En effet pour deux types d'année météo certaines modalités de fertilisation ont aucune donnée. De plus, la plupart des autres modalités sont représentées par seulement 1 ou 2 individus ce qui n'est pas représentatif.

Pour approfondir le sujet, nous avons réalisé des graphiques en nuage de points représentant le rendement en fonction de la dose de fertilisation azotée. Cela permet d'identifier l'ensemble des individus un par un et non pas de regarder des moyennes. Nous avons intégré dans ces graphiques, les individus avec les variétés intermédiaires et productives pour avoir plus de données pour chaque année.

Le graphique de nuage de points permet de voir que toutes variétés et toutes années confondues, les rendements ne sont pas forcément plus élevés avec l'augmentation de la dose en azote (Figure 41). La pente de la droite et le R^2 sont très faibles (0,029 et 0,018). Cependant, trois zones semblent se dégager sur ce graphique. La zone correspondant au triangle vert, la zone correspondant au triangle rouge et la zone entre les deux. Dans la zone du milieu, le rendement augmente avec la dose azotée. La zone rouge correspond au cas où les rendements sont bas compte tenu de la fertilisation. On peut faire l'hypothèse qu'elle correspond au cas où la fertilisation n'a pas permis d'augmenter de façon notable le rendement. Enfin, la zone verte correspond aux individus dont le rendement semble important compte tenu de la fertilisation. Nous avons donc essayé d'identifier les individus des différentes zones en regardant notamment le type de variété et d'année météo. Ainsi, un code couleur a été utilisé pour différencier le type d'année météo et des formes pour différencier le type de variété. On remarque que la zone rouge concerne principalement les années P/M et PP/P alors que la zone verte concerne principalement les années M/M et M/PP.

D'après le tableau 14, on remarque que dans la zone rouge, il y a 36 % d'individus avec le type d'année P/M, 29 % avec le type d'année météo PP/P et 14 % d'individus avec le type d'année météo P/PP alors que ces types d'année météo représentent respectivement 24%, 10% et 9% de

Figure 42 : courbe de tendance de l'évolution du rendement en fonction de la dose d'azote en précédent féverole et pois en sols profonds

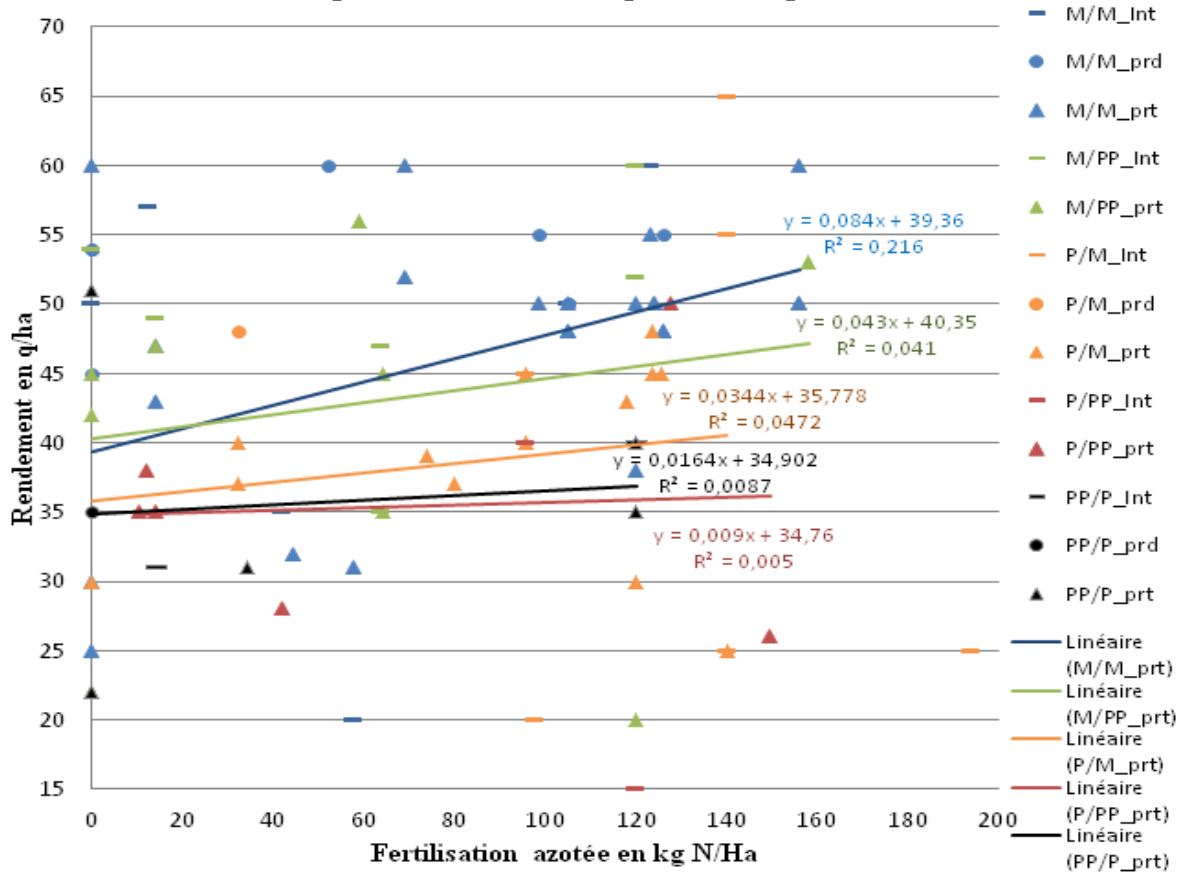
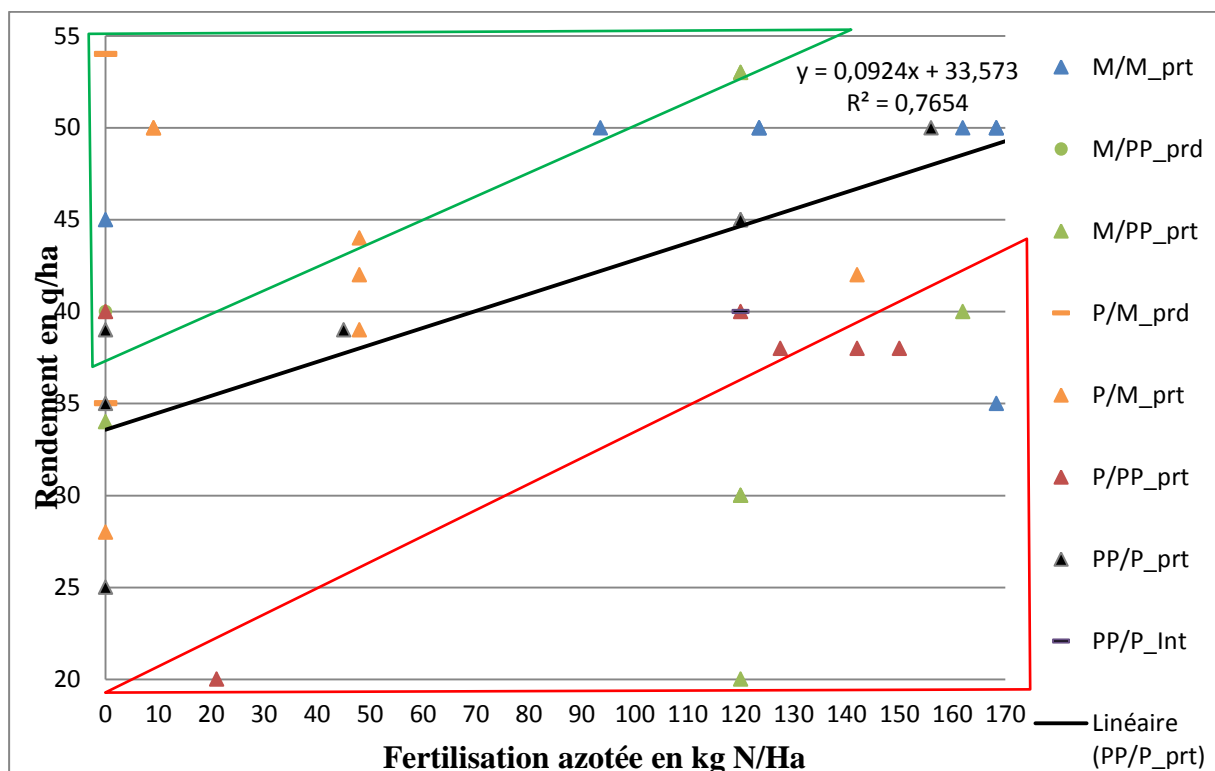


Figure 43: courbe de tendance de l'évolution du rendement en fonction de la dose d'azote en précédent féverole et pois en sol intermédiaires séchant



l'effectif total. Ils sont donc surreprésentés dans la zone rouge. De plus, ces types d'année météo représentent chacun 5 % de l'effectif de la zone verte. Ils sont donc sous-représentés dans la zone verte. Il semblerait donc que ces années là, les blés aient moins bien valorisé l'azote présent dans le sol (reliquat et apport d'azote). Malgré tout, plusieurs individus en année P/M ont vu leur rendement augmenter avec la dose d'azote.

A l'inverse, dans la zone rouge, il y a respectivement 14 % et 7 % des types d'année météo M/M et M/PP alors que ces derniers représentent 40 % et 18 % de l'effectif total. Ces années sont donc sous représentés dans la zone rouge. De plus, ces types d'année météo sont surreprésentés dans la zone verte. Il semblerait donc que ces années, le blé ait bien valorisé l'azote présent dans le sol (reliquat et apport d'azote).

On remarque également, que les variétés productives ne sont pas présentes dans la zone rouge et sont majoritairement présentes dans la zone verte. Ainsi, les variétés productives, représentent 25 % des individus de la zone verte alors qu'elles représentent seulement 11 % de l'effectif total. Elles représentent 36 % des individus du type d'année météo M/M dans la zone verte alors qu'elles représentent seulement 22 % des individus de ce même type d'année météo. Il semblerait donc que les variétés productives valorisent mieux l'azote en termes de rendement. On constate également que dans la partie du milieu, les variétés intermédiaires sont situées en général au dessus des variétés à protéine, elles semblent donc mieux valoriser l'azote en termes de rendement que les variétés à protéine.

Des courbes de tendance ont été réalisées par type d'année météo en variété protéine (Figure 42). En prenant en compte l'ensemble des individus, les courbes de tendance confirment les observations faites précédemment. Pour les années P/M, P/PP et PP/P, les pentes sont faibles voire quasiment nulles. Alors que pour les années M/M et M/PP, les pentes sont plus importantes. On remarque que la pente des années M/PP est moins importante que la pente des années M/M. On peut supposer que les faibles pluviométries aux printemps ont limité la minéralisation des engrais organiques qui ont donc moins bien été valorisés. Cependant les R^2 sont très faibles ce qui ne traduit aucune corrélation linéaire entre le rendement et la fertilisation. L'ordonnée à l'origine des droites des années M/M et M/PP est plus importante de 5 q/ha que les autres années. Cela est certainement du aux RSH plus importants lors de ces années.

2.1.2 Cas des sols intermédiaires séchants

Compte tenu du faible nombre d'individus sur ce type de sol, nous n'avons pas réalisé d'analyse de variance. Lorsqu'on regarde toutes années et variétés confondues, nous pouvons faire le même constat que pour les sols profonds : les rendements ne semblent pas augmenter avec la dose d'azote (Figure 43). Toutes années et variétés confondues l'équation de la courbe de tendance est la suivante $y = 0,035x + 38,10$ et le R^2 est de 0,071. Lorsqu'on regarde par type d'année météo, il semblerait que les cas où les apports d'azote n'ont pas été bien valorisés par la culture soient majoritairement lors des années M/PP et P/PP c'est-à-dire lorsqu'il y a eu un déficit hydrique au printemps. Les cas où les rendements paraissent hauts compte tenu de la dose d'azote semblent être majoritaires lors des années P/M et M/M où il n'y a pas eu de déficit hydrique important. Pour le type d'année PP/P, la courbe de tendance a une pente importante avec un R^2 de 0,76. Il est donc possible de mettre une évidence une relation linéaire entre le rendement et la dose d'azote. Nous pouvons faire l'hypothèse que grâce à la pluie pendant le printemps, il y a eu une bonne minéralisation du sol et des engrais. Cependant ces observations sont faites sur un nombre très limité d'individus, il est donc impossible d'affirmer cette relation.

Figure 44 : rendement du blé en fonction du type de précédent en sols profonds, avec une fertilisation nulle à très faible avec des variétés à protéine

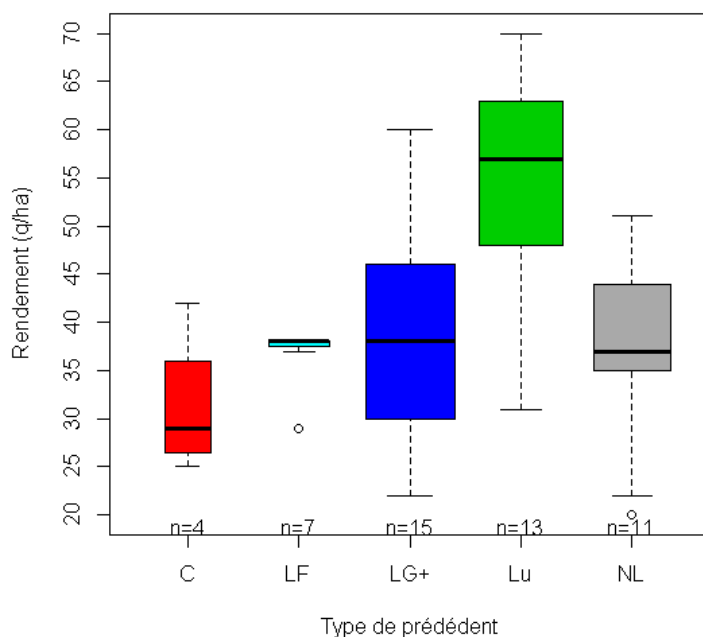


Tableau 15: nombre d'individus en fonction du précédent et du type d'année météo pour l'étude de l'impact du précédent en sols profonds

	C	LF	LG+	Lu	NL	Total
M/M	1	6	5	6	2	20
M/PP	1	0	4	1	5	11
P/M	2	0	1	2	2	7
P/PP	0	1	3	1	1	6
PP/P	0	0	2	3	1	6
total	4	7	15	13	11	50

- En résumé

Pour conclure, il n'a pas été possible de quantifier l'impact de la fertilisation sur le rendement, cependant, ces analyses montrent qu'en précédent féverole et pois en sols profonds et intermédiaires séchants, il n'y a pas de relation linéaire entre le rendement et la fertilisation et que l'effet de la fertilisation n'est pas significatif. En sols profonds, les cas où l'azote n'a pas été bien valorisé par la culture sont en majorité rencontrés lors des hivers avec un excès d'eau. De fortes pluies peuvent détériorer la structure du sol et ainsi limiter la porosité, et par conséquent la présence d'air ou d'eau. Elles peuvent également saturer le sol en eau. Ces phénomènes limitent la minéralisation du sol et des engrais et par conséquent l'azote minéral nécessaire à la culture. Cela peut affecter en majorité le nombre de talle/pied mais également le nombre de grain/épis voire le PMG si la structure du sol est très détériorée dans la suite du cycle de la culture.

En sols intermédiaires séchants, les cas où les apports d'azote ne sont pas valorisés par la culture semblent être majoritaires lors des années où il y a eu peu d'eau sur une longue période en sortie d'hiver ou au printemps. Ce déficit affecte directement la culture par un stress hydrique mais l'absence d'eau limite également la minéralisation et ainsi la disponibilité en azote du sol. Ce manque d'eau et/ou d'azote au printemps peut affecter le nombre de grain/épis et le PMG.

Avec les données disponibles, il n'est pas possible d'affirmer que ces faibles rendements soient dus aux fortes pluies hivernales en sols profonds ou au manque d'eau en sols intermédiaires séchants, ils peuvent également être dus à d'autres facteurs limitants tels que les adventices, les maladies et ravageurs, la température, une mauvaise levée, etc.

2.2 Quantification de l'impact du type précédent sur le rendement

Pour étudier ce facteur, nous avons sélectionné les cas avec une fertilisation nulle à très faible. En effet étudier la variation des rendements en fonction du précédent dans les cas avec une fertilisation reviendrait à étudier l'interaction précédent / fertilisation azotée et non pas seulement l'effet précédent. De plus, nous avons observé précédemment qu'il existait probablement des interactions entre les facteurs fertilisation azotée et type d'année météo. Etudier la variation des rendements en fonction du précédent dans les cas avec une fertilisation reviendrait donc à intégrer ces interactions ce qui ne permettrait pas d'interpréter les résultats.

De plus, il a été choisi de fixer un type de sol et un type de variété. Ainsi, 2 analyses de variance ont pu être effectuées compte tenu du nombre de données disponibles :

- sur sols profonds, avec une fertilisation nulle à très faible et en variété à protéine
- sur sols intermédiaires séchants, avec une fertilisation nulle à très faible et en variété à protéine

2.2.1 *Cas des sols profonds*

Les rendements en précédent luzerne sont largement supérieurs aux autres précédents (Figure 44). Ainsi, plus des $\frac{3}{4}$ des rendements de luzerne sont supérieurs à 45 q/ha. Les précédents LF (trèfle), LG+ (féverole et pois) et NL (tournesol, colza et lin) obtiennent sensiblement les mêmes rendements entre eux. Les rendements en précédent céréale sont plus faibles que les autres. Le nombre de données pour les précédents céréale et LF sont faibles.

Le nombre d'individus en précédent céréale est seulement de 4 et celui en précédent LF est seulement de 7 (Tableau 15). Pour les précédents LG+, Luzerne et NL, le nombre d'individus en bonne et moyenne année sur sols profonds (M/M et M/PP) représente près de 60% des individus. Ce chiffre est de 50% pour le précédent céréale et de 85 % pour le précédent LF ce qui est

Tableau 16 : résultat du test de Newman Keuls sur l'effet du précédent sur sols profonds

Modalités	Minimum	Maximum	Moyenne	Groupe (Newman Keuls)
Lu	31	70	53,23	a
LG+	22	60	38,13	b
NL	20	51	37,17	b
LF	29	38	36,57	b
C	25	42	31,25	b

Tableau 17 : nombre d'individus en fonction du précédent et du type d'année météo pour l'étude de l'impact du précédent en sols intermédiaires séchant

	C	LF	LG+	Lu	NL	Total
M/M	1	8	2	1	2	13
M/PP	0	2	1	1	2	6
P/M	2	1	3	1	2	9
P/PP	0	0	1	0	0	1
PP/P	0	0	2	2	1	5
total	3	11	8	5	7	34

Figure 45 : rendement du blé en fonction du type de précédent en sols intermédiaires séchant

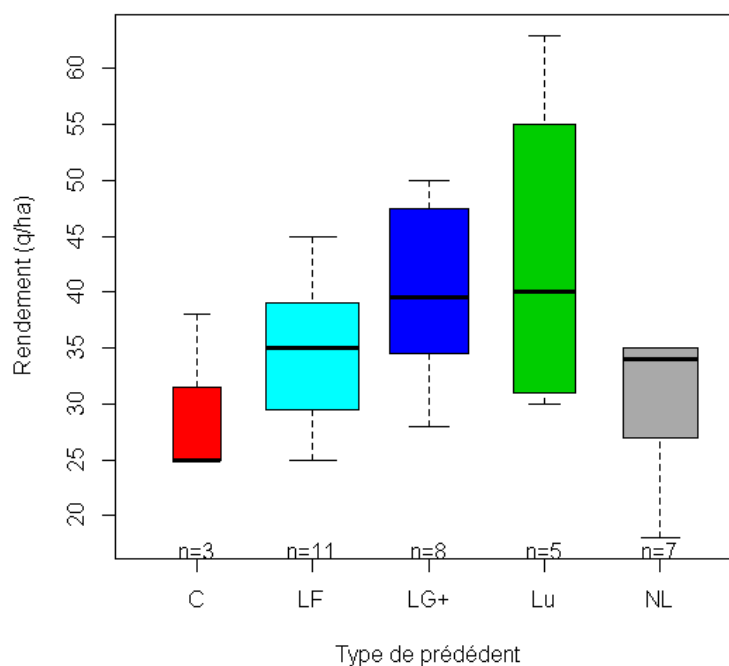


Tableau 18 : résultat du test de Newman Keuls sur l'effet du précédent sur sols intermédiaires séchant

Modalités	Minimum	Maximum	Moyenne	Groupe (Newman Keuls)
Lu	30	63	43,8	a
LG+	28	50	40,12	ab
LF	25	45	34,64	ab
NL	18	35	30,14	b
C	25	38	29,33	b

légèrement supérieur aux autres. Nous pouvons donc faire l'hypothèse que l'effet précédent n'est pas biaisé par le facteur type d'année météo.

Seul l'effet précédent a été intégré au modèle d'analyse de variance. Celle-ci met en évidence un effet précédent est très significatif. Le test de Shapiro et de Bartlett montrent que les résidus sont normaux et que la variable précédent a une variance homogène. D'après le test de Newman Keuls, les rendements en précédent luzerne sont significativement plus élevés que les rendements des autres précédents (Tableau 16). Ainsi, en sols profonds, avec une fertilisation nulle à très faible et en variété à protéine, les blés avec un précédent luzerne obtiennent en moyenne 15 q/ha de plus que les blés avec un précédent féverole et pois et 16 q/ha de plus que les blés avec un précédent trèfle et NL (tournesol, colza, et lin) et 22 q/ha de plus que les blés avec un précédent céréale. Les rendements de blés avec un précédent céréale ne sont en moyenne pas significativement différents des précédents LG+, NL et LF malgré une moyenne inférieure de 5 à 7 q/ha par rapport à ces précédents.

2.2.2 Cas des sols intermédiaires séchants

Le nombre d'individus est de 34 (Tableau 17). Pour les précédents C, LG+, luzerne, et NL, les individus en bonnes années (seulement M/M en sols intermédiaires séchants) représentent entre 20 et 30 % des individus pour chaque précédent. Cependant, ils représentent 73 % des individus en précédent trèfle (LF). On peut donc s'attendre à ce que les rendements en précédent trèfle soient bons.

En sols intermédiaires séchants, les blés de luzerne atteignent des rendements plus importants que les blés avec les autres précédents (Figure 45). Les rendements en précédent LF et NL sont globalement moins importants que ceux en LG+ malgré le nombre plus important d'individus en bonnes années pour les précédents LF. Les rendements en précédent céréale sont légèrement inférieurs au précédent NL.

D'après l'analyse de variance, l'effet du précédent est significatif. Les résidus sont normaux et le facteur précédent a une variance homogène. Le rendement des blés précédent luzerne est significativement différent des rendements des précédents NL et céréale (Tableau 18). Ainsi, le précédent luzerne permet en moyenne de gagner 14 q/ha par rapport au précédent C et NL. Malgré les 9 q/ha de différences entre le précédent luzerne et LF, ces deux précédents ne sont pas significativement différents l'un de l'autre. De plus, malgré les 11 q/ha de moins en précédent céréale qu'en précédent LG+, cette différence n'est pas significative.

- En résumé :

L'effet précédent est quantifié à 22 q/ha en sols profonds et à 14 q/ha en sols intermédiaires séchants. Les meilleurs rendements sont obtenus précédent luzerne et les moins bons en précédent céréale. Ces résultats sont toutefois à prendre avec précaution compte tenu du nombre de données faible en précédent céréale dans les deux cas.

Ces analyses ont visé à étudier l'effet d'un facteur particulier sur le rendement et par conséquent d'une pratique particulière sur le rendement. Cependant, le rendement résulte d'un ensemble de pratiques culturales avec en plus un effet du sol et de l'année. L'ACM et la classification permettent de prendre en compte l'ensemble de ces facteurs et de dégager des stratégies globales de production.

Figure 46 : graphique des modalités de l'ACM sur le jeu de données initial

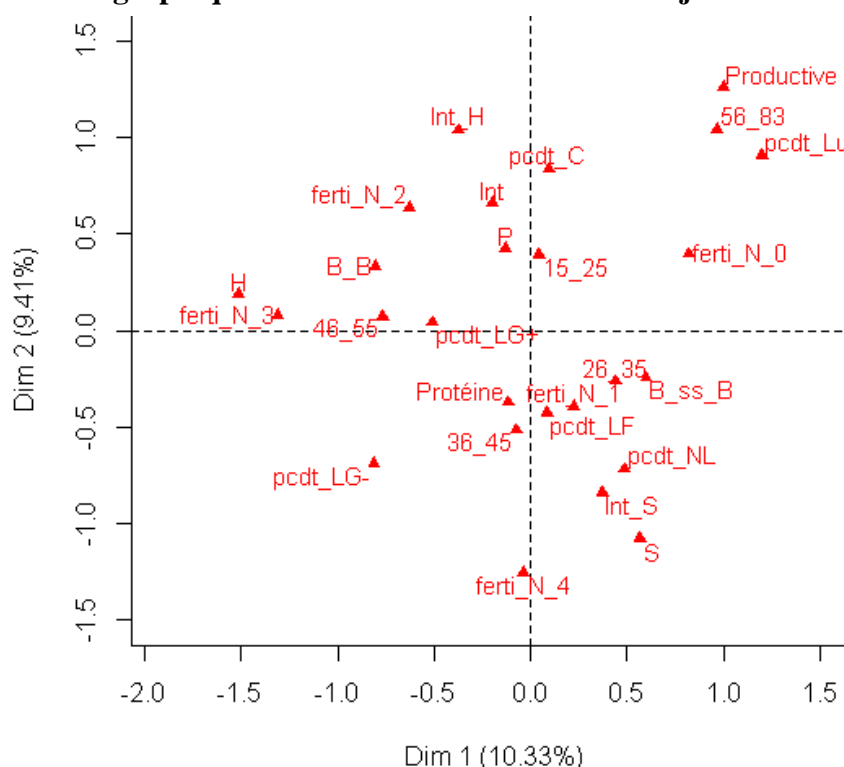


Tableau 19 : modalités caractérisant la classe 1 de la classification

Facteurs	Modalités principales (% de la modalités dans la classe)
Rendement	36 à 45q/ha (26%), 46 à 55 q/ha (75%)
Fertilisation azotée	Elevé (72%), moyenne (10%)
Type de précédent	Féverole (83%)
Type de variété	Protéine (90%)
Présence de binage	Oui (90%)
Nombre de passage de HE et/ou B sol	1 à 2 passages (70%)
Type d'année météo	M/M (43%), P/M (18%), PP/P (17%) M/PP (14%)

Tableau 20 : modalités caractérisant la classe 2 de la classification

Facteurs	Modalités principales (% de la modalités dans la classe)
Rendement	15 à 25q/ha (32%), 46 q/ha à 55 q/ha (32%), 55 à 83q/ha (25%)
Fertilisation azotée	Elevée (64%), très élevée (36%)
Type de précédent	LG- (70%), LG+ (30%)
Type de variété	Protéine (67%), intermédiaire (32%)
Présence de binage	Oui (82%)
sol	Profonds (LAp) (79%)
Type d'année météo	M/PP (36%), PP/P (21%), P/M (25%),

3) Etude de l'impact de l'ensemble des pratiques culturales sur le rendement

On rappelle que deux ACM suivie d'une classification ont été effectuées : une sur le jeu de données initial et une sur le jeu de données complètes.

3.1 Etude sur le jeu de données initial

Pour donner de l'importance au rendement, nous l'avons considéré en actif. Nous avons vu précédemment que la fertilisation, la variété et le type de précédent pesaient beaucoup dans le rendement, nous avons donc choisi de mettre ces facteurs en actif. Le facteur sol a également été intégré en actif car sinon il était difficile d'identifier un ou plusieurs type de sol pour les classes de rendements. Nous avons également mis le facteur présence de binage pour identifier d'éventuelles différences de rendement en fonction de l'utilisation d'une bineuse ou non. Le facteur nombre de désherbages mécaniques a également été testé en actif mais les résultats obtenus étaient moins intéressants. Les facteurs année et agri n'ont pas été mis en actif car ceux-ci participaient énormément à l'élaboration des axes et des classes, les autres facteurs avaient donc moins d'importance. De plus, l'objectif est de prendre en compte la variabilité des années climatiques dans les rendements obtenus. Les sols très humides et très séchants dont le nombre d'individus est restreint, n'ont pas été intégrés à l'analyse car ces derniers participaient énormément à l'élaboration des axes, ce qui nuisait à la qualité de l'analyse.

3.1.1 *Résultat de l'ACM*

Le graphique où sont projetées les modalités permet de voir que les très bons rendements (56 à 83 q/ha) sont majoritairement observés en précédent luzerne avec des variétés productives et une fertilisation nulle à très faible (Figure 46). Les rendements faibles (15 à 25 q/ha) sont observés majoritairement en précédent céréale, type de variété intermédiaire et en sols profonds. Les rendements moyens entre 26 q/ha et 45 q/ha sont obtenus principalement avec une fertilisation azotée faible, sans binage en précédent LF, NL et LG- en sols séchants et intermédiaires séchants. Enfin, les bons rendements (entre 46 et 55 q/ha) sont observés majoritairement avec un précédent LG+, une fertilisation azotée élevée, avec du binage. Si nous rajoutons l'ensemble des facteurs sur ce graphe, celui-ci devient illisible. Pour étudier les autres facteurs, nous avons donc réalisé une classification.

3.1.2 *Résultat de la classification*

Les meilleurs résultats ont été obtenus avec 8 classes. Les facteurs fertilisation, agriculteurs, type de précédent, sol, rendement caractérisent le plus les classes. La présence de herse étrille, de labour, le nombre de déchaumages caractérisent peu les classes.

- Classe 1 :

Cette classe permet de mettre en évidence que les blés de féverole en variété protéine, avec une fertilisation moyenne à élevée qui sont binés, avec 1 ou 2 passage(s) de herse étrille et/ou de bineuse obtiennent, dans 75 % des cas, des rendements entre 46 q/ha et 55 q/ha suivant les années et sont dans la majorité valorisés en panification (Tableau 19). Ces rendements sont rencontrés en majorité sur les sols profonds mais également sur les sols intermédiaires séchants, intermédiaires humides et humides.

- Classe 2 :

Cette classe comporte 28 individus. Cette classe permet de mettre en évidence que les rendements obtenus en précédent LG- (et en moindre quantité LG+), avec du binage, avec des

Tableau 21 : modalités caractérisant la classe 3 de la classification

Facteurs	Modalités principales (% de la modalités dans la classe)
Rendement	26 à 35 q/ha (15%), 36 à 45q/ha (42%), 46 à 55 q/ha (33%),
Fertilisation azotée	très élevée (90%)
Type de précédent	LG+ (30%), NL (30%), LG- (20%), LF (20%)
Type de variété	Protéine (90%) dont 80% de Renan
Présence de binage	Non (95%)
sol	Intermédiaires séchants (75%), séchants (25%)
Type d'année météo	M/M (56%), P/M (20%),

Tableau 22 : modalités caractérisant la classe 4 de la classification

Facteurs	Modalités principales (% de la modalités dans la classe)
Rendement	26 à 35 q/ha (44%), 36 à 45q/ha (34%), 46 q/ha à 55 q/ha (13%),
Fertilisation azotée	Nulle à très faible (63%), faible (25%)
Type de précédent	LG+ (30%), NL (21%), LF (31%), luzerne (15%)
Type de variété	Protéine (90%) dont 58% de Renan
Présence de binage	Non (90%)
sol	Intermédiaires séchants (62%), profonds (32%) / non battants (50%)
Type d'année météo	M/M (34%), P/M (29%), M/PP (18%), P/PP (15%)

Tableau 23 : modalités caractérisant la classe 5 de la classification

Facteurs	Modalités principales (% de la modalités dans la classe)
Rendement	46 q/ha à 55 q/ha (16%), 56 à 83 q/ha (62%)
Fertilisation azotée	Nulle à très faible (99%)
Type de précédent	Luzerne (78%), féverole (18%)
Type de variété	Productive (47%), Protéine (33%)
Présence de binage	Non (90%)
sol	profonds (90%) / battants (69%)
Type d'année météo	M/M (58%), M/PP (16%)

Tableau 24 : modalités caractérisant la classe 6 de la classification

Facteurs	Modalités principales (% de la modalités dans la classe)
Rendement	15à 23 q/ha (34%), 26 à 35 q/ha (28%), 46 q/ha à 55 q/ha (34%),
Fertilisation azotée	Nulle à très faible (25%), moyenne (72%)
Type de précédent	céréale (50%), féverole (28%), trèfle (16%)
Type de variété	Productive (50%), Protéine (40%)
sol	Intermédiaire humides (81%) / battants (88%)
Type d'année météo	PP/P (34%), M/PP (28%), P/M (28%)

Tableau 25 : modalités caractérisant la classe 7 de la classification

Facteurs	Modalités principales (% de la modalités dans la classe)
Rendement	15à 25 q/ha (94%)
Fertilisation azotée	Nulle à très faible (59%), faible (12%), très élevée (12%)
Type de précédent	céréale (45%), LG+ (15%), Luzerne (15%), NL (12%)
Type de variété	Intermédiaire (63%), Protéine (37%)
sol	profonds (54%), séchants (25%) / battants (67%)
Type d'année météo	P/M (58%), M/M (21%),

apports d'azote élevés à très élevés, en sol profonds et variété à protéine et intermédiaire peuvent être très variables selon les années (Tableau 20). Une fertilisation azotée forte ne permet donc pas dans tous les cas d'avoir des rendements élevés même en sols profonds. Ces blés sont valorisés en panification

- Classe 3 :

Le nombre d'individus est de 45 dans cette classe. Cette classe permet de mettre en évidence que les rendements des blés en précédent LG+, NL, LG- et LF, avec une fertilisation très élevée, non binés, en variété à protéine, en sols intermédiaires séchants et séchants sont principalement compris entre 36 et 55 q/ha (Tableau 21). Ils peuvent descendre entre 26 et 36 q/ha certaines années.

- Classe 4 :

Elle regroupe 104 individus. Cette classe permet de montrer que les rendements en variété à protéine, en sol intermédiaires séchants et profonds, avec une fertilisation azotée nulle à faible, avec 0 à 2 passages de désherbage mécanique, en précédents trèfles, féveroles et pois, NL (tournesol, colza, lin) et luzerne obtiennent dans 78 % des cas des rendements entre 26 et 45 q/ha suivant les années (Tableau 22). Ces rendements peuvent atteindre jusqu'à 55 q/ha certaines années.

- Classe 5 :

Cette classe comporte 45 individus. Elle montre que les années météo M/M et M/PP, les blés de luzerne et en moindre quantité de féverole sans apport d'engrais organiques, non binés, avec 1 à 2 passage(s) de désherbage mécanique, en sols profonds peuvent atteindre des rendements très bons même avec des variétés à protéine (Tableau 23). Cependant, les taux en protéine sont bas, le blé est parfois valorisé en panification mais avec une réfraction sur le prix. Dans les autres cas le blé est vendu en fourrager. La houe rotative est utilisée sur 60 % des individus ce qui s'explique par la présence de des sols battants.

- Classe 6 :

Cette classe contient 32 individus. Dans cette classe, les blés précédents céréales, en variété productives à intermédiaires, avec une fertilisation moyenne (61 à 100 kg de N/ha) en sols intermédiaires humides obtiennent des rendements inférieurs à 36 q/ha (Tableau 24).

Les rendements entre 46 à 55 q/ha correspondent aux blés avec un précédent, féverole ou trèfle, en variété protéine, avec une fertilisation moyenne, avec 4 à 6 passages de désherbage mécanique en sols intermédiaires humides.

- Classe 7 :

Cette classe permet de voir que les rendements en précédents céréale, en variété intermédiaire et à protéine, avec une fertilisation nulle à faible (15 à 25 q/ha) en sols profonds ont été faibles lors des années P/M et M/M (Tableau 25). Elle met également en évidence que les rendements en précédent féverole et pois, luzerne et NL (tournesol, colza, lin) peuvent descendre en dessous de 25 q/ha.

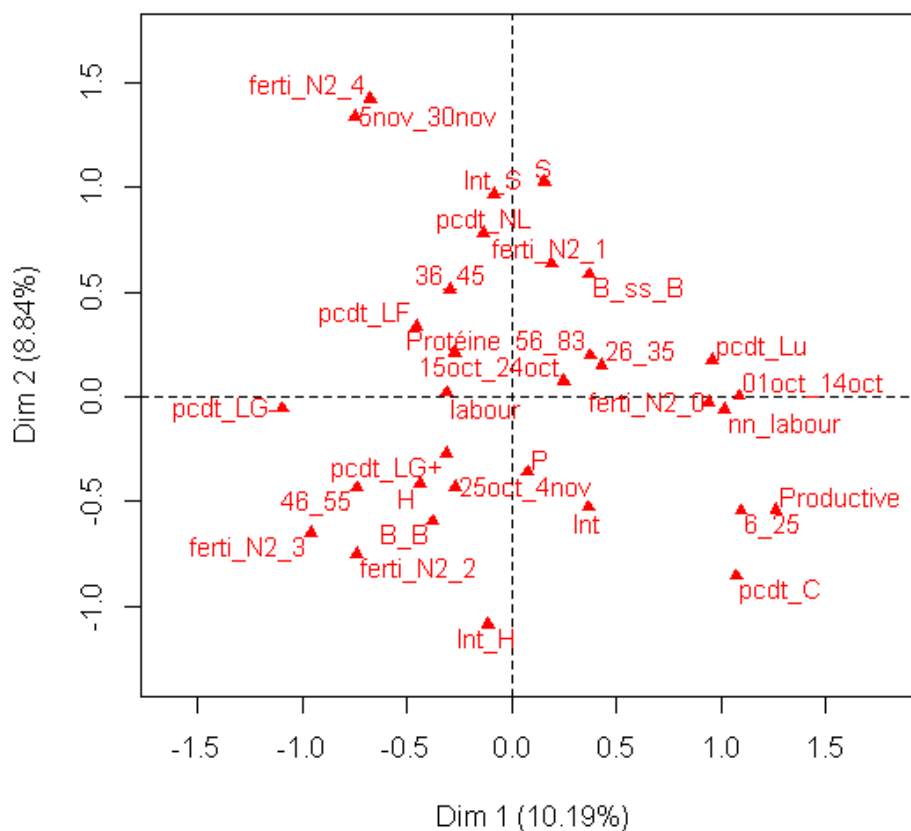
- Classe 8 :

Cette classe comporte 72 individus. Elle met en évidence que les rendements des blés avec une fertilisation faible à moyenne avec des variétés à protéine et intermédiaire, binés, en précédent féverole et pois et trèfle en sols profonds varient de 26 à 45 q/ha suivant les années (Tableau 26).

Tableau 26 : modalités caractérisant la classe 8 de la classification

Facteurs	Modalités principales (% de la modalités dans la classe)
Rendement	26 à 35 q/ha (29%), 36 à 45 q/ha (42%)
Fertilisation azotée	Nulle à très faible (18%), faible (38%), moyenne (40%)
Type de précédent	LG+ (51%), NL (35%)
Type de variété	Protéine (67%), Intermédiaire (33%),
Présence de binage	Oui (81%)
Date de semis	15oct_24oct (36%), 25oct_4nov (19%)
sol	profonds (86%)/ battants (68%)
Type d'année météo	P/M (24%), M/M (22%), M/PP (26%), PP/P (18%)

Figure 47 : graphique des modalités de l'ACM sur le jeu de données complètes



- En résumé :

Cette analyse permet de voir qu'il existe des stratégies différentes suivant les agriculteurs en termes de binage, de fertilisation ou de précédent et que les variations de rendement sont très liées au précédent et à l'année et en moindre mesure à la fertilisation azoté et au type de sol. Ainsi, on voit clairement que les blés avec un précédent céréale sont beaucoup plus faibles que les autres précédents, ils sont majoritairement compris entre 15 et 35 q/ha. Les blés avec un précédent féverole et pois, trèfle, LG- (association protéagineux céréale, lentille, lupin, soja haricots verts) et NL (tournesol, colza et lin) obtiennent majoritairement des rendements entre 26 et 55 q/ha avec les rendements supérieurs qui sont rencontrés lors de fertilisation élevées et très élevées et/ou lors des bonnes années. Les rendements plus faibles sont rencontrés avec des fertilisations nulles à très faibles et/ou en années peu favorables. Enfin, les précédents luzerne en bonne année peuvent atteindre des rendements très élevés. Elle met également en évidence que le nombre de passage de désherbage mécanique n'augmente pas avec la fertilisation.

3.2 Etude sur le jeu de données complètes

3.2.1 *Résultats de l'ACM*

Les mêmes facteurs ont été intégrés en actif avec en plus la présence de labour et la date de semis pour essayer de mettre en lien les modalités de ces facteurs avec d'autres pratiques et si possible avec un rendement.

On observe que les dates de semis précoces, qui toutes situations confondues avaient des rendements inférieurs aux autres dates de semis, sont très liées à une fertilisation nulle, au non labour et au précédent luzerne (Figure 47). Ce groupe de modalités se situe entre les classes de rendements de 6 à 25q/ha et de 26 à 35 q/ha. A l'inverse, les dates de semis tardives (après le 5 novembre) sont très liées à une fertilisation très élevée. Les dates de semis entre le 25 octobre et le 4 novembre semble être reliées au précédent LG+ et au sol humide. La modalité labour se situe au centre du graphique, nous ne pouvons donc rien en tirer.

3.2.2 *Résultats de la classification*

L'ensemble des classes ne sont pas décrites ici, nous allons surtout chercher à expliquer les bas rendements en non labour et en dates de semis précoces. Trois classes regroupent 70 % des blés non labourés et 100% des blés avec une date de semis précoce. Par conséquent, nous présentons seulement ces trois classes.

La première classe permet de mettre en évidence que les dates de semis précoce et le non labour sont surtout associés avec le précédent céréale et luzerne, aux variétés intermédiaires, à une fertilisation nulle à très faible, aux sols profonds et aux années 2012 et 2013. Les rendements sont inférieurs à 25 q/ha.

La deuxième classe met en évidence que le non labour est associé au précédent céréale, avec une fertilisation nulle à très faible, aux variétés productives, aux années 2012 et 2013 et aux sols intermédiaires humides. Les rendements sont compris entre 15 et 35 q/ha.

La classe 3 regroupe majoritairement des blés avec une fertilisation nulle à très faible (75% des individus), avec des variétés à protéine, des rendements entre 26 q/ha et 45 q/ha (82 % des individus), non binés (78 % des individus) et sans labour (62% des cas) avec des précédents divers. Les individus avec des date de semis précoces représentent 1/3 des individus.

Cette analyse a permis de mettre en évidence que les individus en semis précoces et en non labour, dont les rendements sont faibles, sont en grande majorité rencontrés en précédent céréale et luzerne, sans fertilisation et surtout lors des années où les rendements ont été globalement bas. Elle permet également de mettre en évidence que des rendements en non labour et avec des dates de semis précoces ne sont pas dans tous les cas faibles. Par conséquent, les faibles rendements observés en non labour et en date de semis précoce sont certainement dues aux autres pratiques mais surtout aux types d'années météo.

4) Discussion des résultats

Cette étude a permis de faire ressortir plusieurs résultats. Il est important de les confronter aux résultats déjà obtenus.

Elle a permis de confirmer une forte variabilité de rendement interannuelle mais également intra-annuelle. Ainsi, (Le clech et al., 2003) a mis en évidence des variations de rendement allant de moins de 10 q/ha à plus 65q/ha pour une même région. La variation observée (de 15 q/ha à 83 q/ha) est sensiblement identique. Les rendements sont en moyenne de 40 q/ha. D'après (ENOF, 1999), le rendement moyen en blé biologique est situé autour de 40 q/ha. Quinze ans après, nous pouvons faire le même constat sur le réseau de fermes de références où le rendement moyen est à 40 q/ha.

Les différences de rendement obtenues suivant les différents types de sol sont sensiblement les mêmes que ceux présent dans la classification comportementale et agronomique des sols de Seine et Marne (Aubert et al., 2005). Ainsi, les rendements en AB sont presque divisés par deux par rapport aux rendements en conventionnel.

Les rendements plus élevés en précédent luzerne viennent confirmer des résultats déjà observés. Ainsi, sur le dispositif expérimentale de La Motte suivie par Arvalis dans le Val d'Oise les blés de luzerne obtiennent sur une moyenne de 5 ans, 10 q/ha de plus que les blés avec un précédent féverole sans fertilisation azoté (Bouttet et Fontaine, 2010). Les rendements plus faibles en précédent céréale qu'en précédent pois viennent confirmer les résultats de (Schneider et al., 2010). (FIBL, 2008) met en évidence une différence de rendement de 11 q/ha entre un précédent féverole (39 q/ha) et un précédent tournesol (28 q/ha). Dans notre étude, la différence est en moyenne de 1 q/ha en sols profonds et de 10 q/ha en sols intermédiaires séchants.

Les résultats en termes de fertilisation azotée viennent confirmer les résultats obtenus par les essais réalisés par la Chambre d'Agriculture de Seine-et-Marne sur la fertilisation (Billy, 2008). En effet les apports de fertilisation ne sont pas efficaces dans tous les cas. Des facteurs limitants peuvent dans certains cas engendrer une efficacité des engrais nulles ou très réduite. Ces résultats sont également observés par (David, 2004).

Les résultats en termes de variété rejoignent les résultats obtenus lors des essais variétés (Fontaine, 2014). Les variétés productives type Atllass valorisent mieux l'azote en terme de rendement que des variétés à type protéine comme Renan.

Il a été mis en évidence que le nombre de désherbage mécanique n'augmente pas avec la fertilisation. D'après (Glachant, 2013) le nombre de désherbage mécanique dépend beaucoup de l'année. Ainsi, certaines années, peu de créneaux sont disponibles pour désherber mécaniquement, le nombre de désherbage est donc moindre ces années alors que d'autres années, plusieurs créneaux vont être disponibles. De plus, le nombre de passage de désherbage mécanique dépend également de la tolérance en mauvaise herbe de l'agriculteur. Ainsi, certains agriculteurs qui veulent des champs très propres, vont faire plus de passages qu'un agriculteur moins exigeant.

IV. LIMITES ET PERSPECTIVES

Cette étude a mis en évidence certains résultats, cependant ils ont certaines limites. De plus, plusieurs travaux peuvent être envisagés pour approfondir certains points ou en traiter de nouveau qui n'ont pas été abordés au cours du stage.

1) Les limites de l'étude

1.1 La précision des données

Une des limites de l'étude correspond à la précision des données collectées. En effet, les données utilisées dans le cadre de l'étude sont des données à dire d'agriculteur. Ainsi, les rendements sont en moyenne donnés de 2 à 5 q/ha près. Par conséquent, la quantification d'impact d'un facteur observée sur le rendement est également de 3 à 5 q/ha près. La dose d'azote calculée a une précision d'environ 10 à 15 kg de N organique. En effet, la dose du produit apporté n'est pas connue très précisément. De plus, la composition en azote d'un même type de produit est variable, les données utilisées sont des moyennes. Aucune différenciation entre les différents produits et les dates d'apport n'a été faite. Le réseau de ferme de référence n'est donc pas le bon outil pour quantifier précisément l'effet d'une dose d'azote sur le rendement, il permet cependant de voir les grandes tendances en matière d'effet de la fertilisation et d'étudier un nombre important de données avec des situations très diverses ce qui est impossible à mettre en place avec des essais analytiques.

1.2 La nature et le nombre de données disponibles

Pour l'étude, les données de composantes de rendement, de RSH, de notation d'adventices, de maladies et de ravageurs et de structure du sol ne sont pas connues. Les données nous permettent seulement de faire des constats mais ne nous permettent pas d'identifier les processus mis en jeu, il est juste possible de faire des hypothèses sur ces derniers. De plus, le nombre de données disponibles ne nous a pas permis d'étudier tous les facteurs individuellement. Il est donc primordial de collecter l'ensemble des données pour ne pas être contraint d'exclure des individus par manque de données. Pour avoir des données les plus précises possibles, il faut les collecter chaque année et si possible pas trop éloigné de la récolte pour que les agriculteurs se rappellent bien de l'itinéraire technique qu'ils ont réalisé et des rendements qu'ils ont obtenu. En effet, certains agriculteurs du réseau n'enregistrent pas forcément toutes leurs pratiques.

1.3 Le regroupement des modalités

Compte tenu de la diversité des données recueillies sur le réseau, des regroupements de modalités ont du être effectués. Ainsi, un regroupement de précédent, de sol, d'année a été effectué. Il n'a donc pas été possible de différencier l'effet individuel des modalités regroupées. Ainsi, il n'a pas été possible de différencier l'effet précédent d'une féverole et celui du pois ou celui d'un blé et d'une avoine. Il peut malgré tout avoir des différences entre ces précédents.

1.4 L'arrière effet des engrais et des amendements organiques

Outre la précision de la dose d'azote calculée, celle-ci intègre seulement les apports effectués juste avant la culture ou pendant son cycle. Elle n'intègre pas l'arrière effet des engrais et amendements organiques apportés précédemment. Cela permettrait peut être d'expliquer certains cas où le rendement observé est haut compte tenu de la dose d'azote calculée.

2) Perspectives d'étude

Un des premiers travaux à faire après cette étude est de faire le lien entre les résultats mis en évidence par l'étude et les aspects économiques pour pouvoir valoriser ses résultats sous forme de conseils auprès des agriculteurs. D'autres travaux peuvent être réalisés.

2.1 Etudier plus en détail le taux en protéine

De plus, il est possible de mener d'autres études sur ce réseau de ferme. Tout d'abord, seulement le rendement a été étudié, le taux de protéine a juste été abordé avec l'ACM. Il serait intéressant d'étudier le taux en protéine parallèlement au rendement. En effet, la qualité du blé et notamment le taux de protéine impacte le prix de vente du blé et par conséquent la marge brute de l'agriculteur. Il serait intéressant d'étudier en priorité l'effet de la variété, du précédent et de la fertilisation azotée.

2.2 Utiliser l'OAD pour la fertilisation de printemps du blé tendre d'hiver de la CA77

L'outil d'aide à la décision pour la fertilisation azotée de printemps du blé tendre d'hiver qui a été mis au point par la Chambre d'Agriculture de Seine-et-Marne pourrait être utilisé avec les données du réseau. Cet outil calcule a priori la rentabilité d'un apport d'azote de printemps sur la base d'un bilan azoté en prenant en compte des facteurs limitants (climat, structure du sol, adventices, peuplement et maladies/ravageurs). En fonction du bilan azoté et des facteurs limitants, il calcule un rendement réalisable avec et sans l'apport d'azote de printemps et en déduit la rentabilité de l'apport. Cet outil peut être utilisé a posteriori pour identifier des facteurs limitants en comparant le rendement réalisable calculé par l'outil au rendement réel. Cela permettrait d'exclure les individus où un facteur limitant autre que l'azote a eu lieu. A l'inverse, les données collectées sur le réseau de fermes de références pourraient être valorisées pour valider avec un nombre conséquent de données l'outil même si celui-ci est déjà basé sur les résultats obtenus sur près de 50 essais (principalement en Ile-de-France et Centre mais également en Picardie, Drome et Gers). Pour cela, il faudrait collecter les données de facteur limitant de structure du sol, d'adventices, de maladies, de ravageurs et de peuplement végétal pour chaque parcelle. Il faudrait également collecter les données de RSH. Le facteur limitant climat peut, quant à lui, être déterminé en étudiant le climat de chaque année. Cela représenterait un travail de collecte conséquent et nécessiterait d'utiliser un questionnaire d'enquête bien précis pour identifier les facteurs limitants. En effet, la perception de ces derniers peut être différente d'un agriculteur à l'autre. Il serait également envisageable de tester l'outil sur d'autres céréales d'hiver comme le triticale. Pour faciliter cette analyse, il conviendrait de coupler l'outil d'aide à la décision à la base de données Access rassemblant les données collectées sur le réseau. En effet, l'utilisation de l'outil sans le lier à la base de données nécessiterait deux saisies.

2.3 Réaliser de bilans minéraux

Ensuite, il serait également intéressant de faire des bilans minéraux (N, P, K, Mg, C, Ca). Ces derniers peuvent être faits à la culture ou de la rotation pour voir si les apports et les besoins sont équilibrés. Des bilans azotés excédentaires peuvent présenter des risques de lessivage et de pollution de l'eau. A l'inverse, des bilans phosphatés et potassiques déficitaires présentent un risque de baisse de la fertilité des sols à long terme. Un partenariat est d'ailleurs en cours entre la Chambre d'Agriculture de Seine-et-Marne et le CNRS. En effet, une partie des données collectées sur le réseau sont utilisées par le CNRS pour faire une étude des bilans azotés afin d'identifier le risque de pollution de l'eau par les nitrates. Il serait envisageable de reprendre la méthodologie mis en place par le CNRS et effectuer des bilans sur l'ensemble des données du réseau. Concernant le phosphore

et le potassium, il serait intéressant de calculer les bilans à l'échelle de la rotation et de comparer les bilans obtenus en fonction des différentes rotations (notamment avec et sans luzerne) et des pratiques de fertilisation. En effet, la luzerne est très consommatrice de potassium, si aucun apport de potasse n'est effectué, les bilans peuvent être très négatifs (Bonte et al., 2011). Il serait également possible de comparer les rendements obtenus en fonction de ces bilans.

2.4 Continuer le suivi d'enherbement

Enfin, durant le stage, des relevés d'enherbement ont été réalisés sur certaines parcelles du réseau. L'objectif est d'étudier l'évolution de la flore adventice sur le long terme. Il serait donc intéressant de poursuivre ses relevés lors des années à venir et de mettre en relation les résultats avec les données d'itinéraires techniques collectées. Il faut attacher une attention particulière à la méthodologie et notamment de bien identifier le lieu précis du relevé car des personnes différentes pourront être amenées à les effectuer.

CONCLUSION

Les systèmes de grandes cultures sont peu développés en AB. Cela est en partie du aux contraintes techniques et aux variations importantes de rendements rencontrées dans ce type de système. Pour le blé tendre d'hiver, la gestion de la fertilisation azotée et de l'enherbement sont des points primordiaux. Les leviers agronomiques comme la rotation, le choix de la variété, la date de semis doivent être privilégiés. La fertilisation azotée passe en priorité par l'utilisation de légumineuse pour fixer l'azote atmosphérique mais également par des apports d'engrais et d'amendements organiques.

L'étude a pour objectif d'expliquer les variations de rendement et d'identifier les pratiques qui obtiennent les meilleurs rendements. Ainsi, un travail conséquent d'identification des types de sol sur chaque parcelle du réseau de fermes de références en grandes cultures biologiques d'Ile-de-France à été effectué. Ce travail d'identification constitue un résultat important de l'étude car il pourra être réutilisé pour les prochaines études menées sur le réseau. Ainsi, les sols les plus représentés sont les limons battants profonds, les limons battants semi-profonds, les limons battants engorgés semi-profonds, les limons argileux profonds et les limons argileux semi-profonds qui représentent à eux seul 80 % des sols du réseau en termes de surface.

L'étude a confirmé une forte variabilité interannuelle et intra-annuelle des rendements de blé tendre d'hiver qui varient de 15 q/ha à 83 q/ha sur le réseau. Elle a permis de faire une hiérarchisation des facteurs en fonction de leur poids dans l'élaboration du rendement. Ainsi, le facteur du climat et notamment de la pluviométrie est le plus important dans l'élaboration du rendement. C'est ensuite les facteurs du précédent qui pèse le plus dans l'élaboration du rendement. Cela montre l'importance de bien réfléchir la rotation. C'est ensuite le sol, la fertilisation et la variété qui ont le plus de poids dans l'élaboration du rendement. La date de semis et la présence de labour semblent également intervenir dans l'élaboration du rendement. A l'inverse, le nombre de déchaumage, de désherbage mécanique et la présence de binage interviennent peu dans l'élaboration du rendement. Cette première étape a permis d'identifier les facteurs qui devaient être écartés pour étudier un facteur bien précis. Elle a également permis de mettre en évidence les facteurs prioritaires à étudier qui sont le précédent et la fertilisation.

L'effet du précédent ressort significatif dans les 2 cas étudiés. Les rendements en précédent luzerne sont plus élevés que les autres précédents. Cette différence est significative avec l'ensemble des autres précédents en sols profonds avec une fertilisation nulle à très faible (de 0 à 20 kg de N/ha) et avec les précédents tournesol, colza et lin et les précédents céréale en sols intermédiaires séchant avec la même fertilisation. Les rendements en précédent céréale, sont plus faibles que les autres précédents dans l'ensemble des cas étudiés.

Toutes années confondues, l'effet de la fertilisation azotée en sols profonds, en précédent féverole et pois n'est pas significatif. Il a été mis en évidence que les apports d'engrais organiques sont en général mieux valorisés lors des années avec un hiver et un printemps moyennement pluvieux et les années ayant un hiver moyennement pluvieux et un printemps peu pluvieux. En sols intermédiaires séchant, en précédent féverole et pois, il a été mis en évidence que les cas où l'azote apporté n'a vraisemblablement pas bien été valorisé par la culture sont observés en printemps avec un déficit hydrique.

L'étude n'a pas permis de mettre en évidence un quelconque effet du nombre de désherbage et de l'utilisation d'une bineuse sur le rendement. Le nombre de passages de désherbage mécanique ne semble pas être plus important avec l'augmentation de la fertilisation azotée.

Ce travail concerne seulement les aspects techniques, il convient maintenant de mettre en relation les résultats obtenus avec les aspects économiques pour ensuite conseiller les agriculteurs. Les données collectées sur le réseau de fermes de références, peuvent faire l'objet d'autres études. Celles-ci peuvent être menées à l'échelle de la culture mais également à l'échelle de la rotation en faisant par exemple les bilans minéraux. Les systèmes rencontrés sur le réseau sont-ils déficitaires ou excédentaires en azote, en phosphore, en potassium, en carbone ? Es ce que certains systèmes sont plus à risque concernant pollution de l'eau et la baisse de fertilité des sols ? Les rendements sont-ils différents en fonction des bilans obtenus?

BIBLIOGRAPHIE

- Agence BIO, 2014a. *La bio dans les régions*. Consultable : <http://www.agencebio.org/la-bio-dans-les-regions> [Consulté le 13 juin 2014].
- Agence BIO, 2014b. *La bio en France : repères*. Consultable : <http://www.agencebio.org/la-bio-en-france> [Consulté le 13 juin 2014].
- ITAB, 2005. *Maitriser les adventices en grandes cultures biologiques*. ITAB, Paris, 1 ère édition, 104 p.
- Arino J., Aubert C., Bonin L., Fontaine L., Gall, J., Glachant C., Johan G., Leclech N., Le Moine R., Lieven J., Menetrier P., Pottier M., Rolland C., Zaganiacz V., 2012. *Déssherber mécaniquement les grandes cultures*. ITAB, 82 p.
- Aubert C., Bizot E., Glachant C., Proffit L., 2005. *Classification agronomique et comportementale des sols de Seine et Marne*. Chambre d'Agriculture de Seine-et-Marne, 102 p.
- Aubert C., Papin A., 2006. *Valorisation de composts en grandes cultures en Ile de France en systèmes céréaliers biologiques sans élevage*. Chambre d'Agriculture de Seine et Marne, 16 p.
- Bachinger J., Bellon S., Bertelsen I., Brito M., Chable V., Coletta M., Grand A., Kempkens K., Koopmans C., Locatelli M., 2014. *Inspiration to diminish yield gaps in Organing Farming*. European Commission, 2 p.
- Barberi P., 2002. Weed management in organic agriculture: are we addressing the right issues? *Weed Research*, 47, p. 177-193.
- Billy L., 2008. Mise en place d'un outil de gestion de l'azote pour le blé tendre en système de grandes cultures biologiques en zone Centre. Mémoire de fin d'étude. ENITA de Clermont Ferrand, Clermont Ferrand. 38 p.
- Bonte J.-B., Aubert C., Fourrié L., Colomb B., 2011. *Rotations en grandes cultures biologiques sans élevage : 8 fermes-types : 11 rotations. Repères agronomiques, économiques, techniques et environnementaux*. ITAB, 132 p.
- Bouttet D., Fontaine L., 2010. *Compte rendu technique, 3ème année du programme « Demain la bio sur les exploitations grandes cultures de la zone Centre*, p. 20-33.
- Brisson N., Mary B., Ripoche D., Jeuffroy M.H., Ruget F., Nicoulaud B., Gate P., Devienne-Barret F., Antonioletti R., Durr C., Beaudoin N., Recous S., Tayot X., Plenet D., Cellier P., Mchet J-M., Meynard J-M, Delecolle R., 1998. Brisson, Nadine. 1998. STICS : a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. *Agronomie*, 18, p. 311–346.
- Chambre d'agriculture d'Ile-de-France, 2014. *Filières agricoles : Grandes cultures*. Consultable : <http://www.ile-de-france.chambagri.fr/notre-agriculture-filieres-agricoles-grandes-cultures> [Consulté le 10 juin 2014].
- COMIFER, 2013. *Calcul de la fertilisation azotée : Guide méthodologique pour l'établissement des prescriptions locales : cultures annuelles et prairies*. COMIFER, 159 p.
- Cowell L., Bremer E., Van Kessel C., 1989. Yield and N, fixation of pea and lentil as affected by intercropping and N application. *Canadian Journal of Soil Science*, 69, p. 243-251.
- David C, 2009. Chapitre 5, Grandes cultures biologiques, des systèmes en équilibre instable. In : Lamine C et Bellon S (Eds), *Transitions pour l'agriculture biologique, pratiques et accompagnements pour des systèmes innovants*, 129-143. Dijon et Versailles, Quae et educagri.

- David C, 2004. *Le blé en agriculture biologique : diagnostic agronomiques et raisonnement de la fertilisation azotée de printemps*. Institut National Agronomique Paris-Grignon, 122 p.
- Delogu G., Cattivelli L., Pecchioni N., De Falcis D., Maggiore T., Stanca A.M., 1998. Uptake and agronomic efficiency of nitrogen in winter barley and winter wheat. *European Journal of Agronomy*, 9, p. 11-20.
- DRIAAF Ile-de-France et Région Ile-de-France, 2008. *Plan de développement 2009-2013 de l'agriculture biologique en Île-de-France*. Consultable : http://draf.ile-de-france.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf_PlanBioIDF_cle0fba1d.pdf [Consulté le 13 septembre 2014].
- ENOF (European Network of Organic Farming), 1999. *Organic farming research in the EU, Towards 21st century*. ENOF White Book, 108 p.
- FIBL, 2008. *Grandes cultures biologiques sans bétail : Observations après 6 ans de suivi de la ferme pilote de Mapraz*. FIBL, 9 p.
- Fontaine L., 2014. *Comparaison de variétés de céréales en agriculture biologique : Synthèse des essais 2013*. ITAB, 36 p.
- Fontaine L., 2011. *Blés concurrents des adventices*. Consultable : <http://www.itab.asso.fr/programmes/FSOV.php> [Consulté le 14 septembre 2014].
- Gate P, 1995. *Ecophysiologie du blé, de la plante à la culture*. Lavoisier et ITCF, Paris, 429 p.
- Giovanni G., Padovan S., Delogu G., 2004. Grain yield, nitrogen-use efficiency and baking quality of old and modern Italian bread-wheat cultivars grown at different nitrogen levels. *European Journal of Agronomy*, p. 181-192.
- Glachant C., 2013. *Grandes cultures biologiques en Ile-de-France : Suivi de fermes de références : Résultats technico-économiques pluriannuels 2005-2011*. Chambre d'Agriculture de Seine-et-Marne, 52 p.
- Glachant C., Aubert C., 2011. *Résultats des essais menés en Ile-de-France, Campagne 2010-2011*. Chambre d'Agriculture de Seine-et-Marne, 49 p.
- Husson F., Pages J., 2005. *Statistique générale pour utilisateurs 1 - Méthodologie*. Presses Université de Rennes, Rennes, 324 p.
- ITAB, 2005. *Maîtriser les adventices en grandes cultures biologiques*. ITAB, Paris, 1 ère édition., 104 p.
- Jensen H., Loges R., Jorgensen V., Vinther F., Jensen E., 2004. An empirical model for quantification of symbiotic nitrogen fixation in grass-clover mixtures. *Agricultural Systems*, 82, p.181-194
- Lampkin, 1999. *Organic Farming*. Farming Press, 752 p.
- Le Clech B., Hachler B, 2003. *Agriculture Biologique : Synthèse agricole*. Paris, Lavoisier, 312 p.
- Leclerc B, 2009. Fiche technique: la fertilisation organique. In : ITAB, Arvalis – Institut du Végétal (Eds), *Azote matière organiques et engrais verts*. Paris 14^e. 23 mars 2009. p. 4-48
- Leclerc B., 2001. *Guide des matières organiques, Tome 2*. ITAB, Paris, 2ème édition, 85 p.
- Le Guen M., 2005. *La boîte à moustaches de Tukey : un outil pour initier à la Statistique*. inptoulouse, 15 p.
- Mangin M., Cohan J.-P, 2012. Flux d'azote et impact sur la production de blé tendre, comparaison précédent luzerne et féverole. In : ITAB, Arvalis – Institut du Végétal (Eds), *La Luzerne, incontournable en grandes cultures biologiques ?*. Ferme de la Bergerie à Villarceaux. 13 juin 2012. p. 31

- MAAF (Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt), 2013. *Programme Ambition Bio 2017*. Consultable : http://agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/140214-ProgrammeBio-BD_version_cle0b7bd2.pdf [Consulté le 13 juin 2014].
- Nakache J.-P., Confais J., 2003. *Statistique explicative appliquée: analyse discriminante, modèle logistique, segmentation par arbre*. Editions TECHNIP, 300 p.
- Paponov I., Aufhammer W., Kaul H-P., Ahmele F.-P., 1996. Nitrogen efficiency components of winter cereals. *European Journal of Agronomy*, 5, p. 115-124.
- Peigné J., Dupont A., Etienne C., Coquil X., Courand J-P., QuirinT, 2012. Travail sans labour en grandes cultures bio : une technique intéressante mais risqué. *Alter-Agri*, 116, p. 11-14.
- Peigné J., Védie H., Demusy J., Gerber M., Vian J.F., Cannavacciuolo M., Aveline A., Giteau L.L., Berry D., 2008. Techniques sans labour en AB et fertilité du sol. In : INRA (Eds). Montpellier. 19 et 20 mai 2008. p. 17.
- Rodriguez A, 2010. *Eléments de biologie des mauvaises herbes : Les leviers de gestion de la flore adventice*, 170 p.
- Schneider A., Flénet F., Dumans P., Bonnin E., De Chezelles E., Jeuffroy M.H., Hayer F., Nemecek T., Carrouée B., 2010. Diversifier les rotations céréalières notamment avec du pois et du colza – Données récentes d'expérimentations et d'études. *Oilseeds and fats Crop and Lipids*, 17, p. 301-311.
- Soltner D, 2000. *Les bases de la production végétale, Tome 1 : Le sol et son alimentation*. Sciences et techniques agricoles, Sainte Gemmes sur Loire, 22^e éd., 242 p.
- Soulie L., 2006. *Le dispositif de la motte : rotation et fertilité du milieu en agriculture biologique sans élevage : étude de la dynamique de l'azote en conditions limitantes propositions et test d'adaptations de la rotation*. Mémoire de fin d'étude, Institut National Agronomique Paris-Grignon, Paris Grignon, 58 p.
- Triboi E., Triboi-Blondel A. M, 2008. Systèmes de culture autonomes en azote et en énergie, réalité ou utopie ? *Alter Agri*, 89, p. 17-18.
- Université Renne1, 2010. *Corrélation et régression linéaire*. Université Renne1, 23 p.
- Voisin A.S., Salon C., Munier-Jolain N.G., Ney B., 2002. Effect of mineral nitrogen on nitrogen nutrition and biomass partitioning between the shoot and roots of pea (*Pisum sativum* L.), 2002. . *Plant and Soil*, 242, p. 251-262.
- Yang J.-Y., Drury C.F., Yang X.M., De Jong R., Huffman E.C., Campbell C.A., Kirkwood V., 2010. Estimating biological N₂ fixation in Canadian agricultural land using legume yields. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 137, p. 192-201.

Table des Annexes

Annexe 1 : Questionnaire utilisé lors de l'enquête sur les types de sol et définition de quelques termes techniques	II
Annexe 2: Caractéristiques généraux des sous classes de sols de la classification agronomique comportementale des sols de Seine-et-Marne.....	IV
Annexe 3 : Synthèse de chaque bilan de campagne reprenant les faits marquants en termes de pluviométrie, de température, de pression de maladies et d'adventices	V
Annexe 4: Résultat de l'analyse de variance toutes données confondues.....	VII
Annexe 5 : Rendement en fonction de l'agriculteur sur sols profonds	IX
Annexe 6 : Rendement en fonction de la fertilisation azotée et du type d'année météo	X
Annexe 7: Rendements en fonction du nombre de passage désherbage mécanique et de la présence de binage	XI
Annexe 8: Variation des rendements en fonction du nombre de déchaumage	XII
Annexe 9 : Données numériques et description de l'arbre de régression sur le jeu de données initial.....	XIII
Annexe 10 : Résultats de l'analyse de variance sur l'effet de la fertilisation azotée et sur l'effet du précédent	XV

Annexe 1 : Questionnaire utilisé lors de l'enquête sur les types de sol et définition de quelques termes techniques

FICHE PARCELLAIRE - Réseau CA77



EXPERIMENTATEUR Date : Nom : Organisme : CA 77 Adresse : Tel/fax :	AGRICULTEUR Nom : Adresse : Tel : Fax : Canton : Dépt :
Caractérisation de la Parcelle : Nom : Surface :	
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;"> Topographie <input type="radio"/> Pente <input type="radio"/> Plateau <input type="radio"/> Vallée </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;"> Pente <input type="radio"/> < 3% <input type="radio"/> de 3 à 10% <input type="radio"/> > 10 % </div> <div style="text-align: right;"> Coordonnées Lambert X : Y : Altitude : </div> </div>	
Type de sol Jamagne :	
Sous-sol <input type="radio"/> Filtrant <input type="radio"/> Intermédiaire <input type="radio"/> Imperméable	
<div style="display: flex; flex-wrap: wrap;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: 50%;"> Drainage <input type="radio"/> oui <input type="radio"/> non </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: 50%;"> Drainage efficace <input type="radio"/> oui <input type="radio"/> non </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: 50%;"> Irrigation <input type="radio"/> oui <input type="radio"/> non </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: 50%;"> Besoin en irrigation <input type="radio"/> oui <input type="radio"/> non </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: 50%;"> Battance <input type="radio"/> oui <input type="radio"/> non </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: 50%;"> Sol sain <input type="radio"/> oui <input type="radio"/> non </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: 50%;"> Fleurissement au prtp <input type="radio"/> oui <input type="radio"/> non </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: 50%;"> Très hydromorphe <input type="radio"/> oui <input type="radio"/> non </div> </div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px;"> Pierrosité <input type="radio"/> < 15% <input type="radio"/> de 15 à 50% <input type="radio"/> > 50 % </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-top: 10px;"> Bonne reprise au ptps <input type="radio"/> 9 à 10 années sur 10 <input type="radio"/> 6 années sur 10 <input type="radio"/> 3 années sur 10 <input type="radio"/> 0 ou 1 année sur 10 </div>
<div style="border: 1px solid black; padding: 2px;"> Flétrissement des cultures <input type="radio"/> jamais <input type="radio"/> cultures d'été, 3 années sur 10 <input type="radio"/> cultures de ptps, 3 années/10 <input type="radio"/> cultures d'hiver qd ptps/été sec (3 années/10) <input type="radio"/> cult hiver qd ptps/été sec ou normal (6 années/10) <input type="radio"/> cult hiver même qd ptps/été humide (9 années/10) </div>	
<div style="border: 1px solid black; padding: 2px;"> Travail superficiel seul : sur 5-8 cm maximum <input type="radio"/> oui <input type="radio"/> non </div>	
<div style="border: 1px solid black; padding: 2px;"> Labours fréquents <input type="radio"/> oui <input type="radio"/> non </div>	
Analyse de sol : pH KCl : % % argiles : Calcaire : % % limons fins : CEC : % % lim. grossiers : % MO : (si possible, joindre l'analyse de sol)	
Type de sol classification :	
<div style="border: 1px solid black; padding: 2px;"> Système d'exploitation <input type="radio"/> Grandes cultures <input type="radio"/> Gdes cult. avec cult. Indust <input type="radio"/> Polyculture élevage <input type="radio"/> Elevage prépondérant </div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px;"> Rotation <input type="radio"/> < 3 ans <input type="radio"/> de 3 à 4 ans <input type="radio"/> de 5 à 7 ans <input type="radio"/> > 7 ans </div>
Potentiel de la parcelle (q/ha) en blé : Pois ou orge ptps : Maïs :	
avec présence de prairie : <input type="radio"/> oui <input type="radio"/> non Prairie longue durée retournée dans les 10, 20 à 40 dernières années?	
<div style="border: 1px solid black; padding: 2px;"> Retournement <input type="radio"/> aucun <input type="radio"/> < 10 ans <input type="radio"/> de 10 à 20 ans <input type="radio"/> de 20 à 40 ans </div>	

- Définition de quelques termes

limons très fin: il s'agit de limons les plus petits, ayant la taille des argile (< 2 microns) et étant compris dans la teneur en argile granulométrique dans les analyses de terre :

Fleurissement du sol: capacité des sols, en ressuyage après les grandes pluies d'hiver, à se soulever sur les 5 premiers cm alors que le dessous n'est pas encore ressuyé : il est la caractéristique des limons argileux et se manifeste seulement au-delà d'une teneur en argile de 17-18%.

Battance d'un sol: capacité du sol à se plaquer sous l'effet des pluies, pouvant former une croûte impénétrable lorsqu'elle atteint 2-3 cm. Elle se manifeste seulement dans les sols en voie de dégradation pédologique, avec peu de complexe argilo-humique donc peu de stabilité de structure, avec des teneurs en argiles en général inférieures à 17-18 %. Elles d'autant plus forte que le sol comporte beaucoup de limons très fins.

Forte hydromorphie d'un sol : caractérise les sols qui n'arrivent pas à se ressuyer au printemps et dans lesquelles les reprises des travaux mécaniques se fait toujours en mauvaises conditions. Il s'agit de sols qui sont gorgés d'eau pendant une bonne partie de l'hiver (plus de 2-3 mois).

Ressuyage d'un sol : Un sol est ressuyé à partir du moment où les travaux mécaniques de reprise au printemps peuvent se faire en bonnes conditions de structures des sols.

sol profond : Ici un sol profond une profondeur entre 90-130 cm

sol semi-profond : Ici un sol profond est considéré comme ayant une profondeur entre 60-90 cm

sol peu profond : Ici un sol profond est considéré comme ayant une profondeur entre 30-60 cm

Bonnes conditions de travail du sol : pas trop humide pour éviter le tassement du sol et pas trop sec pour éviter de faire des mottes ou de la terre trop fine

Bonne reprise du sol au printemps: L'état hydrique des sols varie en fonction des années climatiques. Il engendre des conditions de reprises en sortie d'hiver début de printemps, qui peuvent se décliner en 4 catégories pour une implantation des cultures de qualité:

- Tous les ans (sauf année exceptionnelle – 9 à 10 ans sur 10)
- En année à hiver normal ou peu pluvieux (6 à 7 années sur 10)
- Seulement les années à hiver peu pluvieux (3 à 4 années sur 10)
- Quasiment jamais (0 à 1 année sur 10).

Cette capacité de bonne reprise au printemps s'effectue généralement à partir de fin février début mars mais dépend à la fois de la climatologie qui peu avancer ou retarder cette période et aussi du type de sol

Flétrissement des cultures : dans le cadre du questionnaire nous entendons qu'une culture flétrit lorsque son rendement est affecté au minimum à 15 % à cause du stress hydrique

Annexe 2: Caractéristiques généraux des sous classes de sols de la classification agronomique comportementale des sols de Seine-et-Marne.

Caractérisation du type de sol		Guide 4 : Classes 1 ^{ère} clé d'entrée	Guide 4 : sous-classes de sols (d)	Argile %	CEC meq/100g	Types de sols (selon Guide 4 1 ^{ère} clé d'entrée)	Fourchettes de rendements habituelles en culture classique					
							Colza	Blé	Orge	Maïs		
Sols fortement engorgés l'hiver = Jamais de bonnes conditions de reprise même les années peu pluvieuses, déficitaires (a) en pluie	Terres très humides (drainage inefficace)	AS	ASsup	> 25	16 à 25	Argile sableuse	< 18 à 25	< 40 à 60	< 35 à 45	< 50 à 70		
		AE	AEsup *	35 à 55	> 18	Argile engorgée *	18 à 25	40 à 60	< 35	< 50		
		LS	LSe	< 17,5	< 7	Limons sableux engorgé	18 à 25	40 à 60	< 35	< 50 à 70		
		LAE	LAEpp	18 à 25	8 à 11	Limons argileux engorgé	18 à 25	40 à 60	< 35 à 45	< 50		
		SL	SLe	< 12,5	< 6	Sable limoneux engorgé	18 à 25	40 à 60	< 35 à 45	< 50 à 70		
		SC	SCe	< 15	< 7	Sable calcaire engorgé de fond de vallée (non drainé)	18 à 35	40 à 80	< 35 à 45	50 à 90		
		AE	AEpp *	30 à 45	> 15	Argile engorgée * peu profond	18 à 35	40 à 80	< 35 à 45	< 50		
		LBE	LBEPp	12 à 16	7 à 10	Limons battants engorgés peu profonds	18 à 35	40 à 80	35 à 45	< 50		
		AL	AL ^{Ca} pp	40 à 60	> 20	Argile limoneuse carbonatée peu profonde (non drainée)	18 à 35	40 à 80	35 à 45	< 50		
		AL	ALpp	40 à 60	> 20	Argile limoneuse peu profonde (non drainée)	18 à 35	40 à 80	35 à 45	< 50		
		AS	ASp	> 25	16 à 25	Argile sableuse semis profond	25 à 35	60 à 80	< 35 à 45	50 à 90		
		AL	ALsp/a	30 à 50	> 18	Argile limoneuse semis profond sur argile	35 à 45	80 à 100	< 35 à 55	70 à 110		
		AL	ALsp/c	60 à 50	> 18	Argile limoneuse semis profond sur calcaire (non drainé)	35 à 45	80 à 100	45 à 65	70 à 110		
		LAE	LAEsp	18 à 23	12 à 16	Limons argileux engorgés semis profond	35 à 45	80 à 100	45 à 65	90 à 110		
		Sols sains à l'hiver = Bonnes conditions de reprise les années normales et les années peu pluvieuses, déficitaires (a) en pluies	Terres humides en pp (drainées sauf ALpp ? et SCe)	LA	LAp	18 à 23	12 à 16	Limons argileux (drainés)	35 à > 45	80 à > 100	55 à > 65	90 à > 110
LB	LBp			12 à 16	9 à 12	Limons battants (drainés)	35 à > 45	80 à > 100	55 à > 65	90 à > 110		
LAV	LAV			20 à 24	14 à 17	Limons argileux vrais	25 à 45	60 à 100	55 à > 65	90 à > 110		
LC	LCp			12 à 18	7 à 12	Limons calcaires	35 à > 45	80 à > 100	55 à > 65	90 à > 110		
LB	LBtp			12 à 16	9 à 12	Limons battants	35 à > 45	80 à > 100	55 à > 65	90 à > 110		
LF	LFtp			16 à 19	12 à 16	Limons francs	35 à > 45	80 à > 100	55 à > 65	90 à > 110		
LBE	LBEsp			12 à 16	8 à 10	Limons battants engorgés semis profond	25 à 45	60 à 100	35 à 55	50 à 70		
AL	AL ^{Ca} sp/a			30 à 50	> 18	Argile limoneuse carbonatée sur argile semis profond	35 à 45	80 à 100	< 35 à 55	70 à 110		
AL	AL ^{Ca} sp/c			30 à 50	> 18	Argile limoneuse carbonatée sur calcaire semis profond	35 à 45	80 à 100	35 à 65	70 à 110		
LA	LAsp			20 à 28	12 à 16	Limons argileux	35 à 45	80 à 100	55 à 65	90 à 110		
LC	LCsp/c			12 à 18	7 à 12	Limons calcaires sur calcaire	35 à 45	80 à 100	55 à 65	70 à 90		
LF	LFsp			16 à 19	12 à 16	Limons francs	35 à 45	80 à 100	45 à 65	70 à 90		
LB	LBsp			12 à 16	9 à 12	Limons battants	25 à 45	60 à 100	45 à 65	50 à 70		
SA	SA			15 à 25	10 à 17	Sables argileux	25 à 35	60 à 80	45 à 65	50 à 90		
Comportement des cultures quand fin de printemps et début d'été secs	Terres sèches (non drainées sauf par zones ACsp et LCsp/a)			AC	ACsp	> 28	> 20	Argilo-calcaire sur marne (semis-profond drainé)	25 à 45	60 à 100	45 à 65	70 à 110
		LC	LCsp/a	12 à 18	7 à 12	Limons calcaires sur argile (semis-profond drainé)	18 à 45	40 à 100	35 à 55	70 à 90		
		AC	ACpp	> 28	> 20	Argilo-calcaire	25 à 45	60 à 100	45 à 65	70 à 90		
		SS	SSI	< 12,5	< 8,5	Sable sain limoneux	25 à 45	60 à 100	35 à 55	< 50		
		LB	LBpp	16 à 18	9 à 12	Limons battants	18 à 35	40 à 80	35 à 45	< 50		
		SC	SCs	< 15	< 9,5	Sable calcaire sain	25 à 45	60 à 100	35 à 55	< 50 à 70		
		AC	ACsup	> 28	> 20	Argilo-calcaire	18 à 25	40 à 60	35 à 55	< 50 à 70		
		LC	LCpp	12 à 18	7 à 12	Limons calcaires	18 à 25	40 à 60	35 à 45	< 50		
		SS	SSs	< 12,5	< 7,5	Sable sain	18 à 25	40 à 60	< 35	< 50		
		Les cultures de printemps flétrissent, avec une chute (b) de rendement visible (15% à 30%)	Terres très sèches	AS	ASsup	> 25	16 à 25	Argile sableuse	< 18 à 25	< 40 à 60	< 35 à 45	< 50 à 70
				AE	AEsup *	35 à 55	> 18	Argile engorgée *	18 à 25	40 à 60	< 35	< 50
				LS	LSe	< 17,5	< 7	Limons sableux engorgé	18 à 25	40 à 60	< 35	< 50 à 70
		Les cultures d'été flétrissent avec une chute (b) de rendement visible (15% à 30%)	Terres intermédiaires humides semis profond (drainées)	LA	LAsp	20 à 28	12 à 16	Limons argileux	35 à 45	80 à 100	55 à 65	90 à 110
				LC	LCsp/c	12 à 18	7 à 12	Limons calcaires sur calcaire	35 à 45	80 à 100	55 à 65	70 à 90
				LF	LFsp	16 à 19	12 à 16	Limons francs	35 à 45	80 à 100	45 à 65	70 à 90
Les cultures de printemps flétrissent, avec une chute (b) de rendement visible (15% à 30%)	Terres très sèches	AS	ASsup	> 25	16 à 25	Argile sableuse	< 18 à 25	< 40 à 60	< 35 à 45	< 50 à 70		
		AE	AEsup *	35 à 55	> 18	Argile engorgée *	18 à 25	40 à 60	< 35	< 50		
		LS	LSe	< 17,5	< 7	Limons sableux engorgé	18 à 25	40 à 60	< 35	< 50 à 70		

Annexe 3 : Synthèse de chaque bilan de campagne reprenant les faits marquants en termes de pluviométrie, de température, de pression de maladies et d'adventices

Le chiffre de l'année correspond à l'année de la récolte. Ainsi, l'année 2003 correspond au cycle 2002-2003.

- 2003 : Les rendements sont faibles. L'automne a été doux et pluvieux. Les semis ont parfois été effectués en conditions humides ce qui a limité l'enracinement. Lors de l'hiver, des dégâts de gel ont été observés (-10°C alors que les blés étaient riches en eau), les semis les plus précoces ont été les plus touchés. Le mois de mars a été très peu pluvieux, engendrant un stress hydrique, Lors du tallage à l'épiaison, les températures étaient supérieures aux normales et la réserve en eau des sols faible. des températures caniculaires ont été observées en juin (20 jours à plus de 25°C) ce qui a entraîné un faible PMG.

- 2004 : Des conditions proches des normales en termes de température et de pluie tout au long du cycle ont permis des bons rendements. Très peu de maladies ont été observées. L'azote a globalement bien fonctionné.

- 2005 : Les rendements sont bons. Les conditions sont également proches des normales. Seules les fortes températures de fin juin alliées à de faibles précipitations ont eu un peu d'incidence sur les rendements. Les taux de protéines étaient élevés.

- 2006 : Les rendements obtenus cette année sont satisfaisants. Les taux de protéines sont très bons. L'implantation a été réalisée en bonnes conditions avec des températures douces fin octobre ce qui a favorisé une croissance rapide des plantes et une bonne minéralisation. Pendant l'hiver, les faibles précipitations sont favorables aux sols humides. Des températures basses ont provoqué un retard de végétation. Les reliquats d'azote étaient exceptionnellement élevés. Les conditions sont très favorables pour le reste du cycle sauf des faibles précipitations et des températures basses au printemps ont diminué un peu le fort potentiel accumulé dans la première partie du cycle.

- 2007 : les rendements sont faibles, les taux de protéines sont bons (autour de 12%). L'implantation a été faite en bonnes conditions. L'hiver, les précipitations régulières, sans période de gel avec des températures douces ont favorisé le développement des adventices et engendré des RSH élevés. Cependant l'azote a été en partie lessivé à cause des grosses pluies en février. Durant le printemps, il y a eu peu de fenêtres d'intervention pour le désherbage mécanique ce qui a engendré un développement important des adventices. Un mois d'avril sans précipitations et exceptionnellement chaud (jusqu'à 28°C) a engendré un déficit en eau sur l'ensemble des sols.

- 2008 : Les rendements sont corrects mais avec de grandes disparités suivant les situations (enherbement, situation azotée, conditions pédo-climatiques...). Les taux de protéines sont bons. L'implantation a eu lieu en bonnes conditions. L'hiver a été marqué par des pluies régulières et les mois de mars et avril par des précipitations importantes et continues qui ont engendrées une diminution du potentiel en sols à tendance humide. Les fortes pluies et les températures froides ont engendré une faible minéralisation avec des RSH plutôt faibles. Les conditions sont relativement proches des normales dans la suite du cycle.

- 2009 : Les rendements sont bons mais avec un taux en protéine limité. Des températures plutôt fraîches ont été rencontrées à l'automne et en hiver ce qui a engendré un retard de

végétation. De forts gels (-15°C) ont été observés mais sans incidence sur le rendement grâce à la couverture neigeuse. Malgré ces températures fraîches, les RSH ont été relativement bons. Des températures plus douces en fin de cycle et des pluies régulières ont permis de rattraper le retard de végétation accumulé en début de cycle.

- 2010 : Les rendements ont été variables selon les sols, et notamment faibles en sols à tendance séchant. Les semis ont été faits en bonnes conditions. L'hiver a été long et froid jusqu'à -20°C, le rendement a été impacté dans les cas où il n'y avait pas de couverture neigeuse. Les températures sont plus douces par la suite mais les faibles précipitations mi-avril-fin mai ont pénalisé la montaison surtout en sols séchants. Les très fortes températures de fin juin à la première quinzaine de juillet ont perturbé le remplissage des grains dans les secteurs sud de l'Île de France.

- 2011 : Les rendements sont variables, et notamment faibles en sols à tendance séchant. Les mois de décembre et janvier ont été froids ce qui a engendré un retard de végétation. Les précipitations de février à mi-mars et d'avril au 20 mai ont été faibles (5mm d'eau du 1^{er} avril au 20 mai à Melun). Avec des températures très chaudes en mai et avril, le stress hydrique a été important en sols à tendance séchant. En sols profonds, cela a permis de rattraper le retard de végétation et d'avoir une bonne disponibilité en azote. Dans la suite du cycle, les pluies régulières ont limité les chutes de rendement trop importantes en sols séchants. Juillet est resté pluvieux, perturbant les récoltes et posant ponctuellement des problèmes de germination sur pieds.

- 2012 : Les rendements sont moyens en sols profonds et à tendance humide, ils sont meilleurs en sol à tendance séchant. L'automne est peu pluvieux, les semis ont été précoces. L'hiver a été marqué par de forts gels début février (-10°C sans dégelé dans la journée) mais cela a eu peu d'impact sur le blé. Les mois de février et mars ont été secs et doux, ensuite les pluies ont été régulières ce qui a engendré des attaques inhabituellement importantes de rouille jaune, fusarioses et septoriose. Les adventices sont généralement développées. La récolte a également été perturbée par les fortes précipitations.

- 2013 : Les rendements sont moyens. L'automne et le mois de décembre ont été doux et pluvieux, les semis n'ont pas toujours eu lieu en bonnes conditions. Les mois de janvier et février ont été plus doux avec une pluviométrie moyenne. Les reliquats azotés sont faibles, car le lessivage de l'azote a été important à cause des fortes pluies. En situation d'hydromorphie, l'azote a été peu absorbé par la culture. Le printemps a été sec et froid sauf en mai qui a été très pluvieux. Le mois de juillet a été sec et chaud.

Annexe 4: Résultat de l'analyse de variance toutes données confondues

- Analyse de variance sur le jeu de donnée initial

```
Model:rdt ~ annee_M + pcdt + sol + ferti_N2 + code_var + desh_1 + B
      Df  Sum of  Sq RSS  AIC      F value  Pr(>F)
annee_M  4    9696.8   50860  2058.2   23.5572 < 2.2e-16 ***
pcdt     5    7283.3   48446  2035.6   14.1550  9.227e-13 ***
sol      4    4148.7   45312  2009.4   10.0789  8.812e-08 ***
ferti_N2 1    2219.0   43382  1997.0   21.5633  4.651e-06 ***
code_var 2    2158.4   43321  1994.5   10.4872  3.638e-05 ***
desh_1   4    1685.5   42848  1985.8    4.0946  0.002898 **
B        1         6.7   41169  1975.0    0.0648  0.799134
```

Shapiro-Wilk normality test

data: residusrdt

W = 0.9959, p-value = 0.34

Bartlett test of homogeneity of variances

data: residusrdt by sol

Bartlett's K-squared = 2.5769, df = 4, p-value = 0.6309

data: residusrdt by annee_M

Bartlett's K-squared = 12.8948, df = 4, p-value = 0.0118

data: residusrdt by pcdt

Bartlett's K-squared = 10.0446, df = 5, p-value = 0.07398

data: residusrdt by ferti_N

Bartlett's K-squared = 3.1326, df = 4, p-value = 0.5359

data: residusrdt by code_var

Bartlett's K-squared = 5.6401, df = 2, p-value = 0.0596

data: residusrdt by desh

Bartlett's K-squared = 4.9868, df = 4, p-value = 0.2887

- Analyse de variance sur le jeu de données complètes

```
Model: rdt ~ + annee_M + pcdt + sol + ferti_N + code_var + desh + B +
semis + labour + dech
```

	Df	Sum of Sq	RSS	AIC	F value	Pr(>F)
annee_M	4	1797.5	19125	1108.8	5.3685	0.0003925 ***
pcdt	5	4385.7	21713	1137.2	10.4786	5.588e-09 ***
sol	4	2609.7	19937	1118.7	7.7942	7.188e-06 ***
ferti_N2	4	748.3	18076	1095.2	2.2348	0.0664679 .
code_var	2	471.1	17799	1095.5	2.8140	0.0622628 .
desh_1	4	861.9	18189	1096.7	2.5741	0.0388310 *
B	1	61.3	17389	1091.9	0.7325	0.3930751
semis	3	979.5	18307	1100.3	3.9006	0.0097017 **
labour	1	1791.2	19119	1114.7	21.3980	6.572e-06 ***
nb_dech	4	306.1	17634	1089.3	0.9142	0.4565587

Shapiro-Wilk normality test

data: residusrdt

W = 0.9918, p-value = 0.204

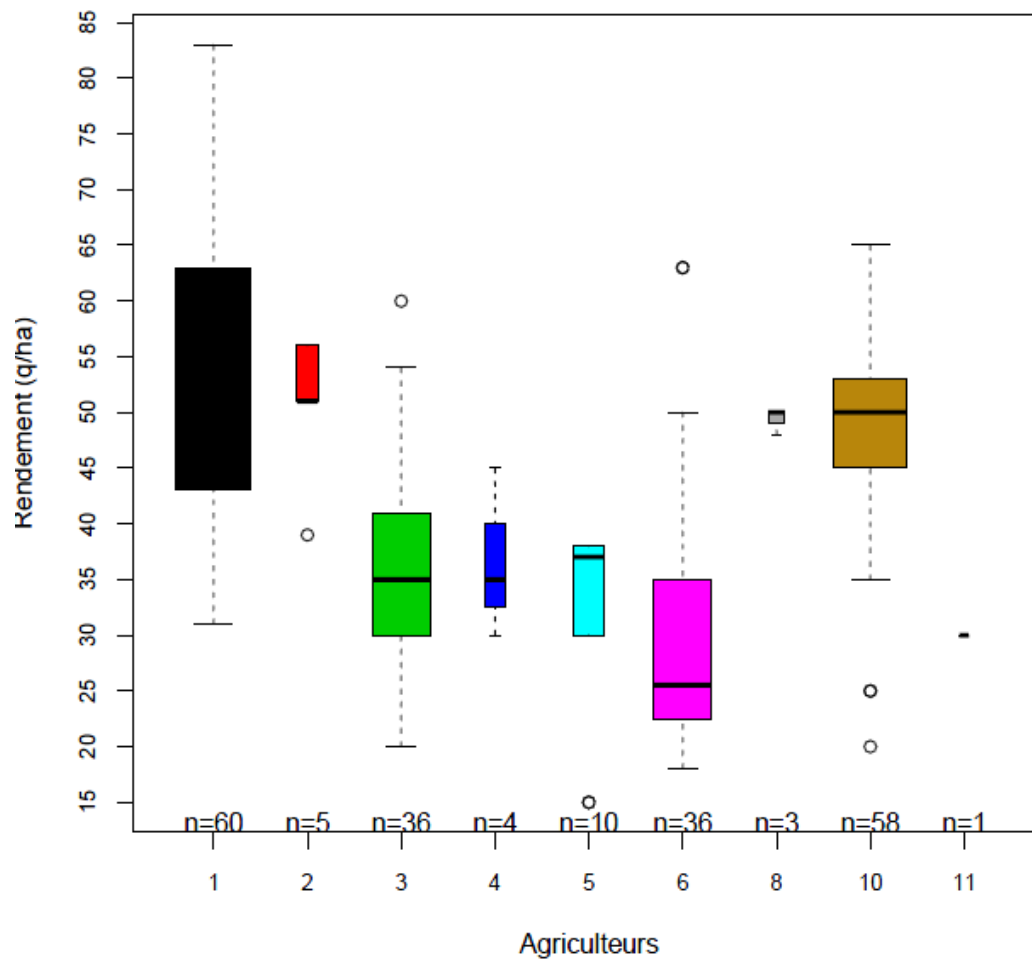
Bartlett test of homogeneity of variances

data: residusrdt by sol

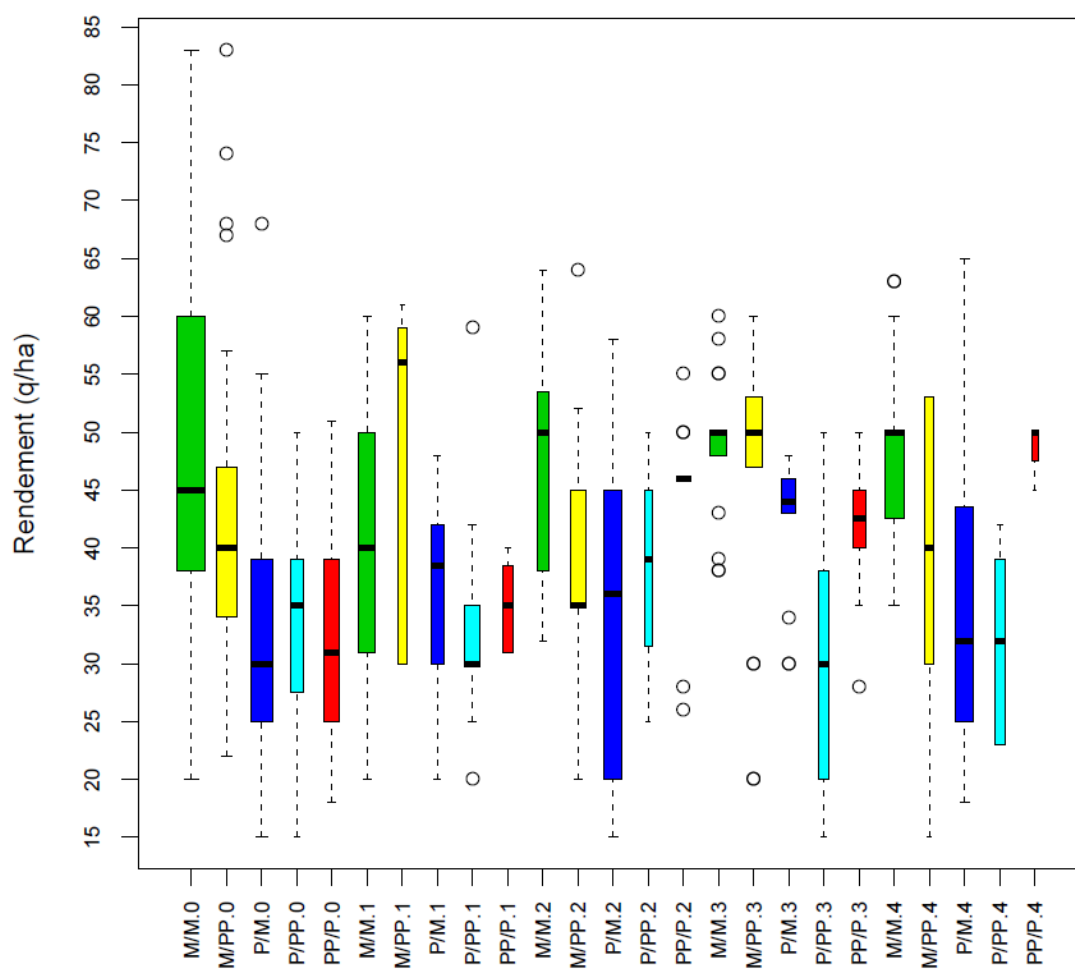
Bartlett's K-squared = 4.1318, df = 4, p-value = 0.3885


```
data: residusrdt by annee_M
Bartlett's K-squared = 10.2748, df = 4, p-value = 0.03604
data: residusrdt by pcdt
Bartlett's K-squared = 8.3653, df = 5, p-value = 0.1372
data: residusrdt by ferti_N
Bartlett's K-squared = 1.9312, df = 4, p-value = 0.7484
data: residusrdt by code_var
Bartlett's K-squared = 5.9269, df = 2, p-value = 0.05164
data: residusrdt by desh
Bartlett's K-squared = 3.657, df = 4, p-value = 0.4544
data: residusrdt by labour
Bartlett's K-squared = 0.1057, df = 1, p-value = 0.7451
data: residusrdt by semis
Bartlett's K-squared = 2.7929, df = 3, p-value = 0.4247
data: residusrdt by dech
Bartlett's K-squared = 5.2253, df = 4, p-value = 0.265
```


Annexe 5 : Rendement en fonction de l'agriculteur sur sols profonds

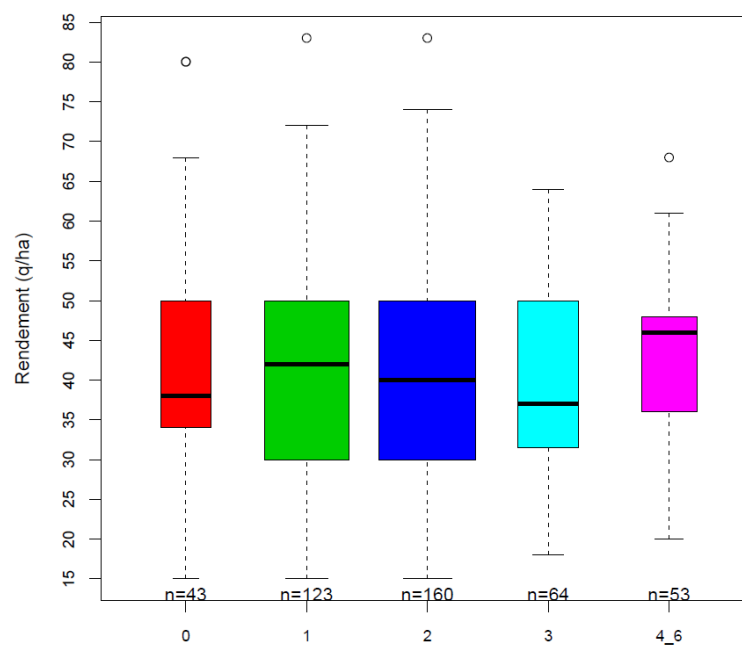


Annexe 6 : Rendement en fonction de la fertilisation azotée et du type d'année météo



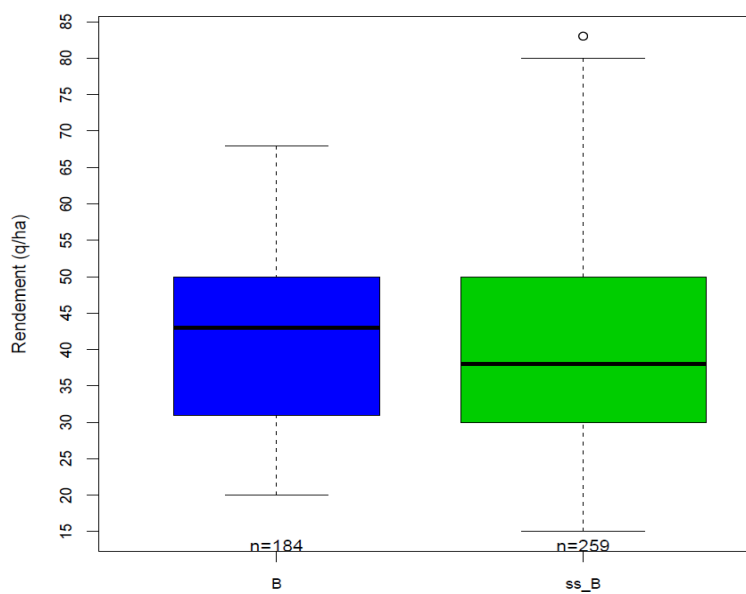
Annexe 7: Rendements en fonction du nombre de passage désherbage mécanique et de la présence de binage

- Nombre de passage de désherbage mécanique



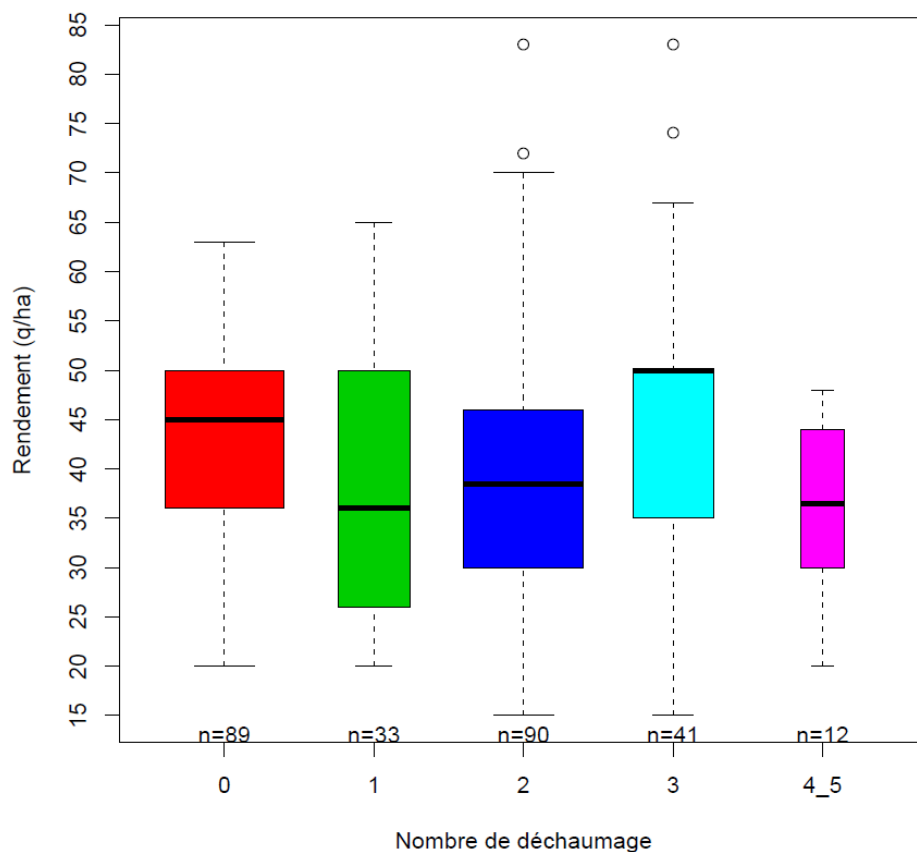
Facteur	Modalités	Minimum	Maximum	Moyenne	Groupe
Nombre de passage de désherbage mécanique	0	15	80	43,28	A
	4_6	20	68	42,7	A
	1	15	83	42,54	A
	3	18	64	39,42	A
	2	15	83	38,88	A

- Présence de binage



Facteur	Modalités	Minimum	Maximum	Moyenne
Binage	B	15	83	40,45
	ss_B	15	67	40,77

Annexe 8: Variation des rendements en fonction du nombre de déchaumage



Facteur	Modalités	Minimum	Maximum	Moyenne
Nombre de passage de déchaumage	3	15	83	50,22
	0	20	60	43,04
	2	15	83	40,07
	4_5	20	48	37,7
	1	20	65	36,84

Annexe 9 : Données numériques et description de l'arbre de régression sur le jeu de données initial

- Données numériques :

Modalité ; nombre d'effectif ; moyenne

- 1) root 443 ; 40.67269
 - 2) annee_M=P/M,P/PP,PP/P ; 215 ; 35.73488
 - 4) pcdt=C,LG- ; 43 ; 29.32558 *
 - 5) pcdt=LF,LG+,Lu,NL ; 171 ; 37.21053
 - 10) sol=H,S,TH,TS ; 21 ; 30.57143 *
 - 11) sol=Int_H,Int_S,P ; 150 ; 38.14000
 - 22) ferti_N=0,1 ; 78 ; 35.25641 *
 - 23) ferti_N=2,3,4 ; 72 ; 41.26389 *
 - 3) annee_M=M/M,M/PP ; 228 ; 45.32895
 - 6) pcdt=C,LF,LG-,LG+,NL ; 190 ; 42.90526
 - 12) ferti_N=0,1,2 ; 117 ; 39.99145
 - 24) sol=H,Int_H,Int_S,S,TS ; 52 ; 36.00000 *
 - 25) sol=P,TH ; 65 ; 43.18462
 - 50) code_var=Int,Protéine ; 57 ; 41.43860 *
 - 51) code_var=Productive ; 8 ; 55.62500 *
 - 13) ferti_N=3,4 ; 73 ; 47.57534
 - 26) desh=2,4_6 ; 34 ; 43.61765
 - 52) sol=Int_S,S ; 14 ; 37.14286
 - 104) annee_M=M/PP ; 7 ; 29.28571 *
 - 105) annee_M=M/M ; 7 ; 45.00000 *
 - 53) sol=H,P ; 20 ; 48.15000 *
 - 27) desh=0,1,3 ; 39 ; 51.02564 *
 - 7) pcdt=Lu ; 33 ; 58.66667
 - 14) sol=Int_H,Int_S,S ; 10 ; 45.10000
 - 28) annee_M=M/PP ; 5 ; 36.00000 *
 - 29) annee_M=M/M ; 5 ; 54.20000 *
 - 15) sol=P ; 23 ; 64.56522
 - 30) code_var=Int,Protéine ; 14 ; 60.00000
 - 60) B=B ; 2 ; 41.00000 *
 - 61) B=ss_B ; 12 ; 63.16667 *
 - 31) code_var=Productive ; 9 ; 71.66667 *

- Description de l'arbre de régression :

Le premier facteur qui discrimine le plus le rendement est le type d'année météo avec les années P/PP, P/M et PP/P qui ont en moyenne un rendement de 35 q/ha et les autres années qui ont un rendement moyen de 45 q/ha. On appelle branche 1 la branche des années P/PP, P/M et PP/P et branche 2 l'autre branche. Dans un deuxième temps c'est le précédent qui discrimine le rendement et ceci dans les deux premières branches. Dans la branche 1 ce sont les précédents céréales et LG- (association protéagineux/céréale principalement) avec un rendement moyen de 29 q/ha qui se détachent des autres précédents qui ont un rendement moyen de 37 q/ha. Dans cette même branche, les sols humides, séchant, très humide et très séchant avec un rendement moyen de 31 q/ha se détachent des autres sols avec un rendement de 38 q/ha. Pour les sols Int_H, Int_S et P c'est la fertilisation azotée qui est le facteur le plus discriminant avec les fertilisations nulles et faibles associées à un rendement moyen de 35 q/ha, qui se différencient des autres fertilisations azotées qui ont un rendement moyen de 41 q/ha.

Dans la branche 2 c'est le précédent luzerne avec un rendement moyen de 59 q/ha qui se détache des autres précédents avec un rendement moyen de 43 q/ha. Ensuite, la variable discriminante n'est pas la même suivant les branches. C'est la fertilisation pour les précédents autres que la luzerne et le sol pour le précédent luzerne. Pour le précédent luzerne on a ensuite les sols profonds avec 65 q/ha en moyenne qui se détachent des sols Int_S, Int_H dont le rendement moyen est de 45 q/ha. Dans les sols profonds, c'est ensuite la variété qui est la plus discriminante avec les variétés productives qui ont un rendement moyen de 71 q/ha qui se détachent des type de variété intermédiaire et à protéine avec 60 q/ha. Dans les autres sols ce sont les années avec une pluviométrie moyenne en hiver et au printemps (54 q/ha) qui se détachent des années avec une pluviométrie hivernale moyenne et printanière faible (36 q/ha).

Pour les précédents autres que la luzerne, ce sont les fertilisations nulles, faibles et moyennes qui obtiennent un rendement moyen de 40 q/ha qui se détachent des fertilisations élevées et très élevées qui ont en moyenne un rendement de 47 q/ha. Pour les fertilisations élevées et très élevées, on a ensuite les classes de nombre de désherbages mécaniques 2 et 4_6 avec 47 q/ha de rendement moyen qui se détache des autres classes de désherbages mécaniques qui ont un rendement moyen de 51 q/ha. Dans les classes de désherbage 2 et 4_6, ce sont les sols profonds et humides (seulement 2 individus) avec un rendement moyen de 48 q/ha qui se détachent des sols intermédiaires séchant et séchant dont le rendement moyen est de 37 q/ha. Pour les sols séchants et intermédiaires séchants, on a les années avec une pluviométrie moyenne l'hiver et le printemps avec 45 q/ha de rendement moyen qui se détachent des années à pluviométrie moyenne l'hiver et faible au printemps dont le rendement est beaucoup plus bas (29 q/ha).

Enfin, pour les fertilisations nulles à très faibles, faibles et moyennes, les sols profonds et très humides (1 individus) avec un rendement moyen de 43 q/ha se séparent des autres sols à 36 q/ha de rendement moyen. Pour les sols profonds et très humides, ce sont ensuite les types de variétés productives qui obtiennent des rendements supérieurs (56 q/ha) aux autres types de variétés (41 q/ha).

Annexe 10 : Résultats de l'analyse de variance sur l'effet de la fertilisation azotée et sur l'effet du précédent

- Effet de la fertilisation

```
rdt ~ ferti_N2 + annee_M
      Df Sum of Sq  RSS    AIC    F value Pr(>F)
ferti_N  4   387.84 5009.2 272.05   1.0490 0.39150
annee_M  4   986.47 5607.8 278.71   2.6682 0.04281 *
```

- Effet du précédent en sols profond

```
Model: rdt ~ pcdt + annee_M
      Df Sum of Sq  RSS    AIC    F value Pr(>F)
pcdt   4  2893.42 6739.1 255.18   7.7119 9.93e-05 ***
```

Shapiro-Wilk normality test
data: residusrdt
W = 0.9457, p-value = 0.05285

Bartlett test of homogeneity of variances
data: residusrdt by pcdt
Bartlett's K-squared = 5.5301, df = 4, p-value = 0.2371

- Effet du précédent en sols intermédiaires séchants

```
Model: rdt ~ pcdt + annee_M
      Df Sum of Sq  RSS    AIC    F value Pr(>F)
pcdt   4  1411.08 2706.9 158.82   6.8062 0.000753 ***
```

Shapiro-Wilk normality test
data: residusrdt
W = 0.9457, p-value = 0.06347

Bartlett test of homogeneity of variances
data: residusrdt by pcdt
Bartlett's K-squared = 5.5301, df = 4, p-value = 0.2371



VetAgro Sup

SARRAZIN, Cyril, 2014, Etude de la variabilité des rendements observés en blé tendre d'hiver en système de grandes cultures biologiques d'Ile-de-France, nombre de pages, mémoire de fin d'études, VetAgro-Sup Campus agronomique de Clermont-Ferrand, 2014.

STRUCTURE D'ACCUEIL ET INSTITUTIONS ASSOCIEES:

- ♦ Chambre d'Agriculture de la Seine-et-Marne

ENCADRANTS :

- ♦ Maître de stage : GLACHANT, Charlotte (Chambre d'Agriculture de la Seine-et-Marne)
- ♦ Tuteur pédagogique : CAPITAINE, Matthieu

OPTION : Agronomie, Productions Végétales et Environnement

RESUMÉ

Les rendements en blé tendre d'hiver en grandes cultures biologiques en région Ile-de-France et plus largement en Europe ont une grande variabilité inter et intra-annuelle. L'étude a pour objectif d'analyser ces variations et d'identifier les facteurs qui en sont responsables. La question suivante se pose : Quelle est la hiérarchisation des facteurs intervenant dans l'élaboration des rendements observés en grandes cultures biologiques d'Ile-de-France et peut-on quantifier l'impact des pratiques culturales sur le rendement ? Les données sont issues du réseau de fermes de références en grandes cultures biologiques d'Ile-de-France suivi par la Chambre d'Agriculture de Seine-et-Marne. Les facteurs qui pèsent le plus dans l'élaboration du rendement sont dans l'ordre : l'année climatique, le précédent, le sol, la fertilisation azotée, le type de variété, la date de semis et la présence de labour. En sols profonds, dans les situations sans apport d'engrais organiques l'effet du précédent est de 22 q/ha entre le précédent luzerne (le meilleur) et le précédent céréales (le moins bon). En sols intermédiaires séchant, cette différence descend à 15 q/ha. L'effet de la fertilisation azotée sur le rendement n'a pas pu être quantifié car dans le seul cas étudié (sol profond, précédent féverole et pois) il ne ressort pas significatif. L'efficacité des apports varie suivant les années météo. La quantification des autres facteurs n'a pas pu être réalisée compte tenu du trop faible nombre de données disponibles.

Mots clés : agriculture biologique, blé tendre d'hiver, rendement, effet précédent, fertilisation azotée, Ile-de-France, sol

